

Разработка состава мелкозернистого бетона на мелком песке, модифицированного комплексной трехкомпонентной добавкой

П.Э. Соколов, Т.Б. Гадаборшева, Д.С. Горюшкин, Н.А. Истомин,

С.Е. Сурков

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Разработан состав мелкозернистого бетона на мелком песке, модифицированный комплексной трехкомпонентной добавкой, включающей метакаолин, суперпластификатор и ускоритель твердения. Проведенное исследование выполнено с использованием плана факторного эксперимента – Вох-Behnken и математического моделирования в среде R. Полученные значения предела прочности при сжатии, изгибе и средней плотности превышают значения контрольного состава. Проведен анализ результатов исследований на предмет их достоверности, получены описательные статистики и проведен их корреляционный анализ. Построена квадратичная регрессионная модель предела прочности при сжатии и визуализированы трехмерные поверхности для исследованных функций отклика. Установлено, что синергетический эффект комплексной добавки обусловлен уплотнением матрицы, снижением водоцементного отношения и ускорением процесса гидратации. Полученные результаты подтверждают возможность применения мелкозернистого бетона модифицированного комплексной добавкой для изготовления сборных и монолитных конструкций, аддитивных технологий и обладает потенциалом для снижения углеродного следа.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, мелкий песок, трехкомпонентная добавка, модель, полиномиальная регрессия, описательные статистики, поверхность отклика, прочность.

В современном строительстве мелкозернистый бетон (МЗБ) на основе мелкого песка играет значительную роль благодаря своей способности к формированию сложных изделий и конструкций, высокой плотности и экономичности за счет использования местных сырьевых ресурсов. Однако применение мелкого песка с высокой долей тонких фракций сопряжено с рядом проблем, таких, как снижение прочности, из-за замедления процесса гидратации цемента и увеличение водоцементного отношения, что приводит к повышению пористости, сегрегации и выделению воды и как следствие к ухудшению реологических свойств бетонной смеси. Эти недостатки ограничивают использование МЗБ на таких песках в ответственных конструкциях, где требуется повышенные характеристики прочности при сжатии и изгибе, а также долговечность.

Сложившиеся современные тенденции в модификации МЗБ в большинстве своем направлены на использование комплексных добавок, включая минеральные наполнители и химические добавки, что позволяет улучшить микроструктуру, снизить водоцементное отношение и повысить плотность и прочность. Особый интерес представляют трехкомпонентные добавки, которые сочетают пуццолановую активность, разжижающее действие суперпластификаторов и ускорение набора прочности за счет интенсификации процесса твердения. Такие комплексные добавки не только повышают механические свойства, но и способствуют частичной замене вяжущего – портландцемента, что является актуальным в современных условиях.

Целью настоящей работы является разработка оптимального состава МЗБ на тонком песке, модифицированного комплексной трехкомпонентной добавкой, содержащей в своем составе метаксаолин, суперпластификатор и ускоритель твердения, с использованием математического моделирования для выявления зависимости от их расхода и прогнозирования его свойств. Достижение данной цели решает следующие задачи: подбор уровней факторов добавки на основе факторного эксперимента; анализ описательных статистик и построение полиномиальной регрессионной модели; визуализация зависимостей прочностных характеристик от переменных с помощью трехмерных поверхностей; оценка практической значимости полученного состава.

Новизна исследования заключается в комплексном подходе к модификации МЗБ на мелком песке с учетом взаимодействия трех компонентов добавки, что позволяет достичь синергетического эффекта в повышении прочности и плотности, а также в применении программных инструментов для оптимизации его состава. Практическая значимость состоит в возможности внедрения разработанного бетона в производство сборных и монолитных

конструкций, снижении расхода цемента и улучшения экологических показателей.

МЗБ представляет собой разновидность бетона, где фракция крупного заполнителя заменена на более мелкие компоненты, что позволяет получать хорошо формуемые смеси, имеющие высокую плотность для сборных и монолитных изделий и конструкций. Согласно ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия, МЗБ характеризуется размером частиц не более 5 мм, с преобладанием фракций менее 2 мм, что обеспечивает повышенную однородность бетона и качество поверхности. Однако использование мелкого песка, с модулем крупности $M_k < 1,5$ приводит к увеличению удельной поверхности заполнителя, что требует дополнительного расхода воды приводит к снижению прочности МЗБ на 15 – 25 % по сравнению с традиционным тяжелым бетоном [1]. Исследования показывают, что применение песка с таким гранулометрическим составом приводит к расслоению и повышению пористости. Поэтому для компенсации этих эффектов необходимо введение в бетонную смесь модифицирующих добавок [2].

В зарубежной литературе основной акцент делается на экологических аспектах, например, применение отходов в виде золы-уноса, как частичной замены традиционного кварцевого песка, что позволяет снизить антропогенное воздействие от добычи природных ресурсов, однако требует тщательной оценки механических свойств [3]. Российские авторы подчеркивают технологические преимущества МЗБ на мелком песке для самоуплотняющихся смесей, где низкая подвижность компенсируется добавками, обеспечивающими удобоукладываемость без применения вибрации [4, 5].

Минеральные добавки, такие как метакраин, играют ключевую роль в уплотнении матрицы МЗБ, что способствует снижению пористости на 10 – 20% [6, 7]. Зарубежные работы демонстрируют, что введение метакраина в дозировке 5 – 15% повышает прочность при сжатии в возрасте 28 суток по

сравнению МЗБ не содержащими его [8, 9]. В российских исследованиях отмечается, что наличие метакаолина приводит к росту нормальной густоты цементного теста особенно для смесей на песке с высоким содержанием мелких зерен [10].

Суперпластификаторы, как на основе поликарбоксилатов, так и на основе нафталинсульфонатов диспергируют частицы цемента, снижая при этом водоцементное отношение (В/Ц) на 20 – 30%, не изменяет, сроки сохранения удобоукладываемости бетонной смеси, повышая подвижность МЗБ [11]. Зарубежные авторы отмечают синергию суперпластификатора и метакаолина в самоуплотняющихся смесях, где их комбинация позволяет достичь классов прочности В60 при расходе цемента – 360 кг/м³ [8]. Работы российских авторов акцентированы на применении суперпластификаторов в МЗБ для обеспечения равномерности распределения мелких фракций песка [12].

Ускорители твердения, стимулируют раннюю гидратацию, ускоряя набор прочности на 50 – 100% в первые 24 часа. В зарубежных разработках ускорители твердения применяются совместно с подогревом мелкозернистой бетонной смеси, при этом температура способствует ее ускоренному схватыванию [13]. Российские источники акцентируются на применении ускорителей твердения совместно с суперпластификаторами, при этом не только сокращается время схватывания, но и повышается морозостойкость, что важно для МЗБ на мелком песке, предназначенных для условий эксплуатации в холодном климате [14, 15].

Комплексное применение метакаолина, суперпластификатора и ускорителя твердения в МЗБ обеспечивает синергетический эффект: метакаолин – уплотняет структуру, суперпластификатор – улучшает реологические свойства, а ускоритель твердения – ускоряет схватывание и затвердевание [15]. Зарубежные исследования по 3D – печатному бетону показывают, что дан-

ные три компонента повышают экструзируемость и прочность на изгиб, минимизируя отрицательные эффекты мелкого песка [16].

Зарубежные исследователи применяют математическое моделирование для оптимизации МЗБ в аддитивном производстве, фиксируя взаимодействия метакаолин – суперпластификатор [17]. Подход российских исследователей основывается на интеграции ГОСТ и экспериментальных планов для разработки составов. Несмотря на очевидный прогресс, остаются пробелы в системных исследованиях трёхкомпонентных систем именно на мелком песке – отсутствует унифицированный анализ взаимодействия в условиях изменяемой гранулометрии. Данная работа направлена на заполнение этого пробела, с помощью моделирования в программной среде R.

При проведении исследований в качестве вяжущего вещества использовался портландцемент марки ПЦ 500-Д0-Н, соответствующий ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия, с удельной поверхностью – 350 м²/кг и нормальной плотностью теста – 26%. Местный мелкий песок, с модулем крупности $M_{кр} \leq 1,2$, преимущественная фракция < 0,63 мм и содержанием глинистых частиц не более 3% по массе, что соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия, для песков класса П. Вода для затворения – водопроводная, отвечающая требованиям ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия.

Комплексная трехкомпонентная добавка включает в себя:

- метакаолин (x1) – высокоактивный пуццолановый компонент с удельной поверхностью – 15-20 м²/г и содержанием аморфного SiO₂ и Al₂O₃ не менее 90%. Расход варьировался в пределах 5-10% от массы цемента;
 - суперпластификатор (x2) – поликарбоксилатного типа Sika ViscoCrete 106 с расходом – 0,4 – 2,0% от массы цемента;
-

- ускоритель твердения (x_3) – Sika Rapid 22 – композиция неорганических солей и сурфактантов, с расходом 1,0 – 2,0% от массы цемента.

Базовый состав мелкозернистого бетона без добавок имел состав 1:3:0,45, что обеспечивало подвижность смеси П2 по ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия.

Исследования проводились с использованием плана факторного эксперимента типа Вох-Behnken для трех факторов на трех уровнях, что позволило минимизировать количество опытов (15 точек, включая три центральные реплики) при учете квадратичных эффектов и взаимодействий [17]. Факторы: x_1 – расход метаксаолина (уровни: 5; 7,5; 10%); x_2 – расход суперпластификатора (0,4; 1,5; 2,0%); x_3 – расход ускорителя твердения (1,0, 1,5, 2,0). Отклики: r_1 – предел прочности при сжатии (МПа), r_2 – предел прочности при изгибе (МПа), ρ_1 – средняя плотность (т/м³).

Приготовление составов бетонных смесей, формование образцов – кубов с ребром 100 мм и призм размерами 40×40×160 мм, их уплотнение и твердение проводилось в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Испытания на прочность серий изготовленных образцов проводились с применением испытательной машины МИИ-100 для определения предела прочности при изгибе и гидравлического пресса ПИ-100-1-1-4 для установления предела прочности при сжатии. Изучение микроструктуры полученных образцов производилось на электронном микроскопе «МЕТАМ ЛВ».

Полученные в результате исследований данные обрабатывались в среде R. Модель полиномиальной регрессии второй степени подбиралась с использованием функции $lm()$ для формулы:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon, \quad (1)$$

где y - отклик, β - коэффициенты, ε - случайная ошибка.

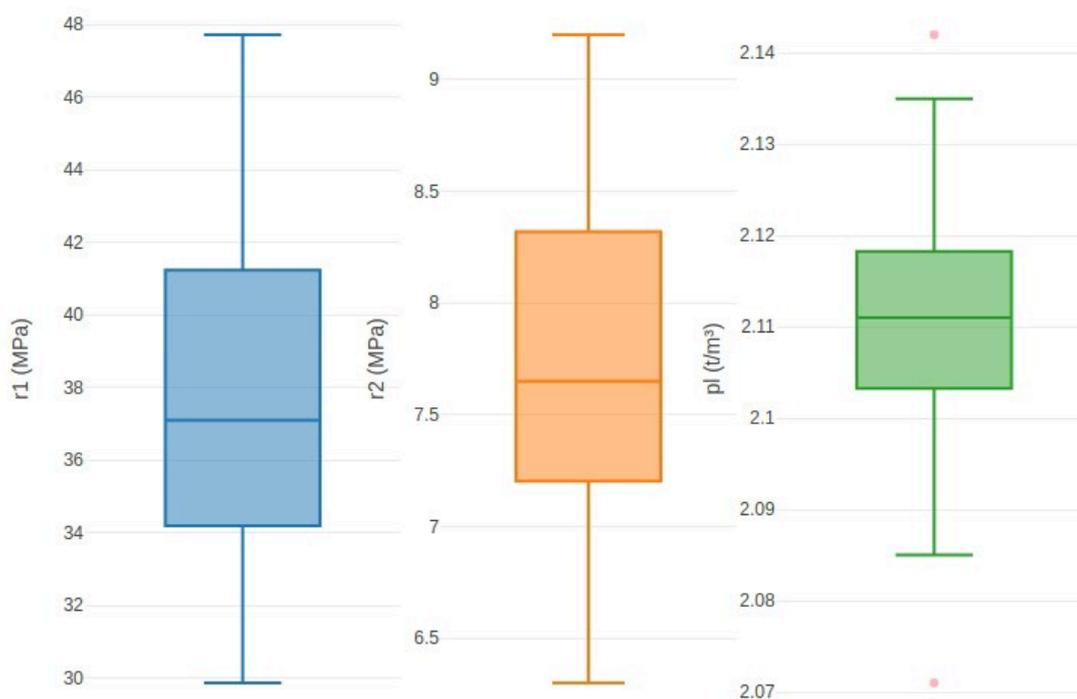


Рис. 1. – Диаграмма размахов функций отклика

Подбор модели проводился методом пошаговой регрессии (stepwise) с использованием информационного критерия Акаике (AIC) для выбора наилучшей модели из нескольких альтернативных и удаления незначимых факторов или взаимодействий. Значимость оценивалась по p -уровню ($<0,05$), коэффициенту детерминации R^2 и скорректированному коэффициенту детерминации – R_{adj}^2 . Статистическая обработка включала проверку на нормальность остатков (тест Шапиро-Уилка) и отсутствие мультиколлинеарности ($VIF < 5$).

Экспериментальные данные, полученные в соответствии с принятым планом факторного эксперимента, представлены в таблице №1.

Визуализация описательных статистик выполнена с использованием диаграмм размахов см. рис. 1 и диаграмм функции ядерной плотности см. рис. 2.

Таблица № 1

Результаты экспериментов (фрагмент)

№ п/п	Факторы			Отклики		
	x1	x2	x3	r1	r2	pl
1.	10	2	1,5	41,34	7,76	2,103
2.	7,5	0,4	1,0	39,98	8,37	2,135
3.	7,5	1,2	1,5	29,88	7,13	2,111
...
13.	10	0,4	1,5	34,26	9,12	2,135
14.	7,5	1,2	1,5	46,06	7,21	2,109
15.	7,5	2,0	1,0	34,16	7,32	2,119

В таблице №2 приведены рассчитанные описательные статистики полученных результатов эксперимента.

Таблица № 2

Описательные статистики факторов и откликов

Переменная	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Медиана	Коэффициент симметрии	Коэффициент эксцесса
x1	7,33	2,06	5	10	7,5	0,00	-1,50
x2	1,24	0,62	0,4	2,0	1,2	0,10	-1,29
x3	1,43	0,38	1,0	2,0	1,5	0,14	-1,36
r1	37,93	6,20	29,86	47,72	37,1	0,41	-0,81
r2	7,67	0,91	6,3	9,2	7,64	0,27	-0,96
pl	2,11	0,02	2,07	2,14	2,11	0,12	-0,58

Анализ данных приведенных в таблице №2 показывает, что прочность при сжатии (r1) варьируется в диапазоне 29,86-47,72 МПа, наибольшими значениями при x1=5%, x2=2%, x3=1,5% (47,42 МПа) и x1=10%, x2=1,2%, x3=2% (47,72 МПа). Прочность при изгибе (r2) изменяется от 6,3 до 9,2 МПа, а плотность (pl) – от 2,07 до 2,14 т/м³, с минимальной дисперсией ($\sigma=0,02$). Коэффициенты асимметрии и эксцесса указывают на близкое к нормальному распределению всех переменных, что подтверждается тестом Шапиро-Уилка ($p>0,05$ для всех откликов).

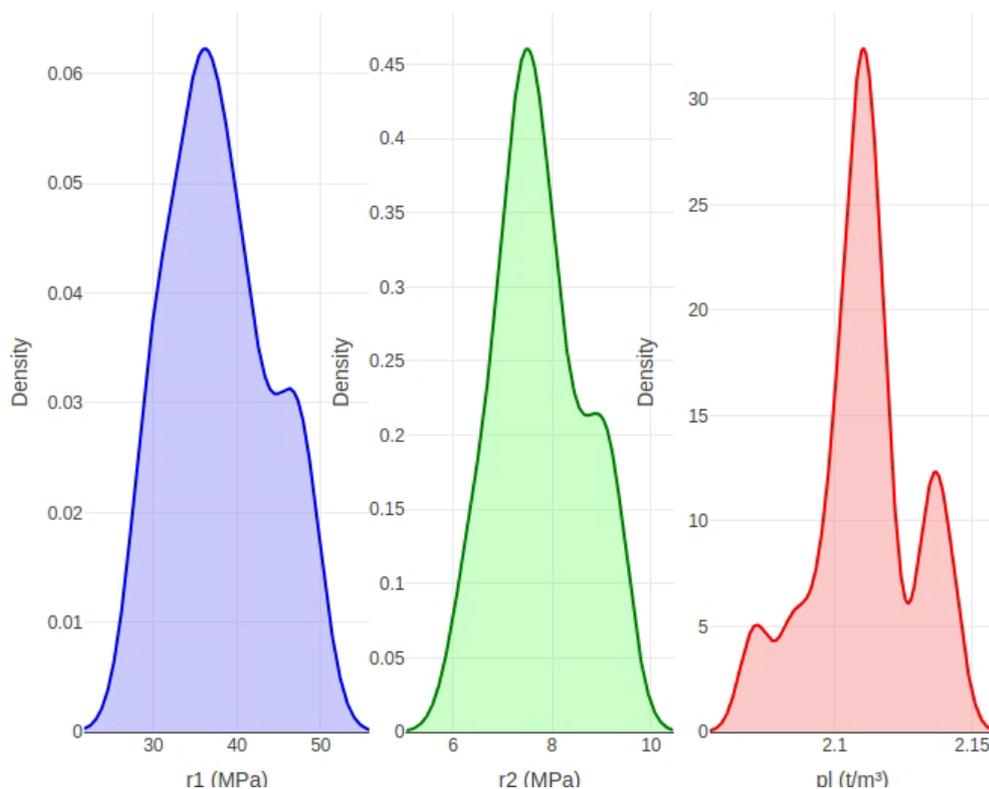


Рис. 2. – Диаграммы ядерной функции плотности для переменных отклика

Корреляционная матрица, отражающая степень связи между исследованными переменными изображена на рис. 3.

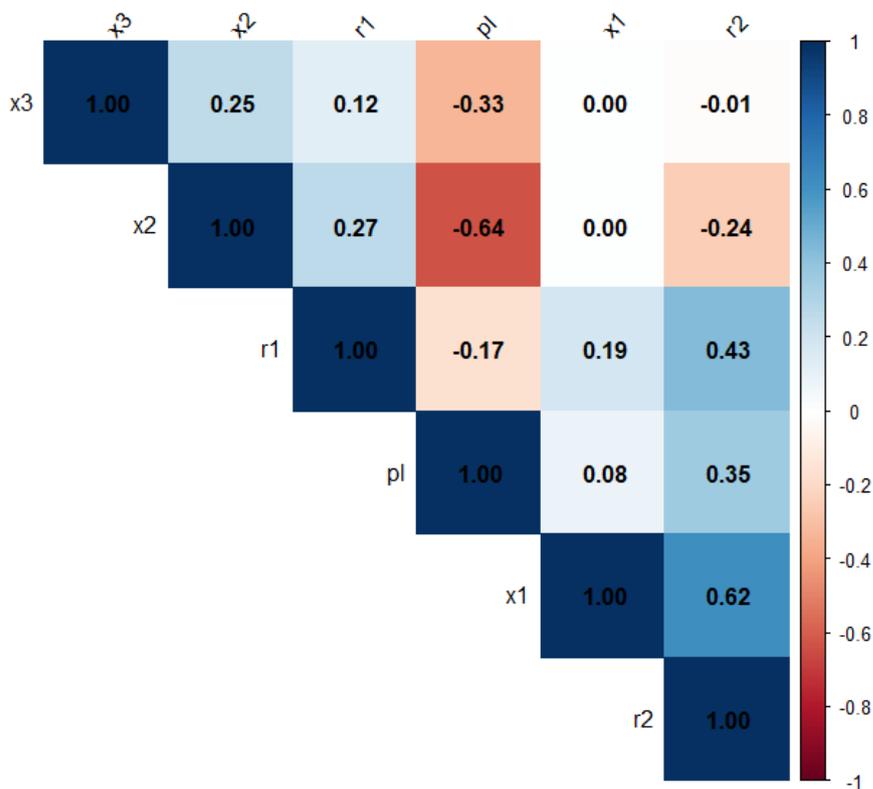


Рис. 3. – Корреляционная матрица исследованных переменных

В качестве примера рассмотрим моделирование зависимости предела прочности при сжатии от исследованных факторов, для которой была построена модель полиномиальной регрессии второй степени со взаимодействиями. Для получения наилучшей упрощенной модели была использована функция $\ln()$ и применен метод пошагового исключения на основании критерия АІС, которая имеет следующий вид:

$$r_1 = 22,2 + 2,3x_1 + 14,7x_2 + 7,1x_3 + 0,1x_1^2 - 4,1x_2^2 - 2,6x_3^2 - 0,9x_1x_2. \quad (2)$$

Полученная нами модель является статистически значимой и хорошо описывает экспериментальные данные. Коэффициент детерминации для данной модели составляет $R^2 = 0,8856$, следовательно, она объясняет 88,56% изменчивости зависимой переменной r_1 . Только 11,44% изменчивости r_1 осталось необъясненным, что связано со случайными факторами или переменными, не включенными в модель. Скорректированный коэффициент детерминации $R_{adj}^2 = 0,7712$, корректирует обычный R^2 , который «наказывается» за добавление в модель незначимых предикторов, т.е. растет только в том случае, если новая переменная, добавленная в модель улучшает модель больше, чем можно было бы ожидать случайно. После учета «штрафа» за количество предикторов, реальная объясняющая способность модели для генеральной совокупности оценивается в 77,12%. Модель в целом значима, следовательно, как минимум некоторые из предикторов имеют систематическую связь с переменной r_1 . Значимость предикторов варьируется, что указывает на то, что в модели, присутствуют как сильные, так и слабые предикторы.

Для анализа зависимости r_1 от x_1 (расход метакаолина) и x_2 (расход суперпластификатора) при фиксированном x_3 (среднее значение расхода ускорителя твердения – 1,43%) построены трехмерные поверхности отклика.

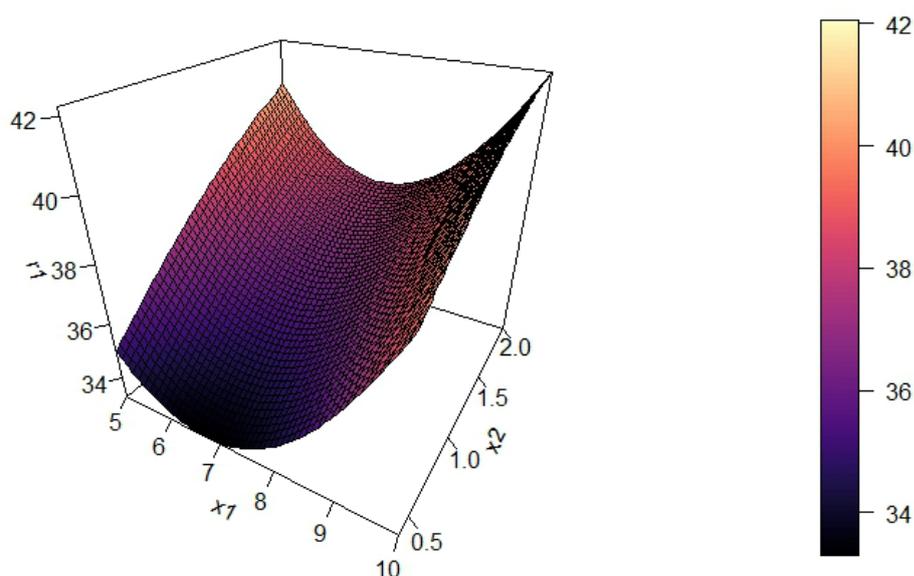


Рис. 4. – Поверхность зависимости r_1 от x_1 и x_2

Поверхность имеет параболическую форму с минимумом около $r_1=32,8$ МПа при $x_1 \approx 7,5\%$ и $x_2 \approx 1,2\%$. Максимальные значения $r_1 > 40$ МПа наблюдается при высоких уровнях x_1 (10%) и x_2 (2%), что согласуется с экспериментальными данными (опыты 9 и 12).

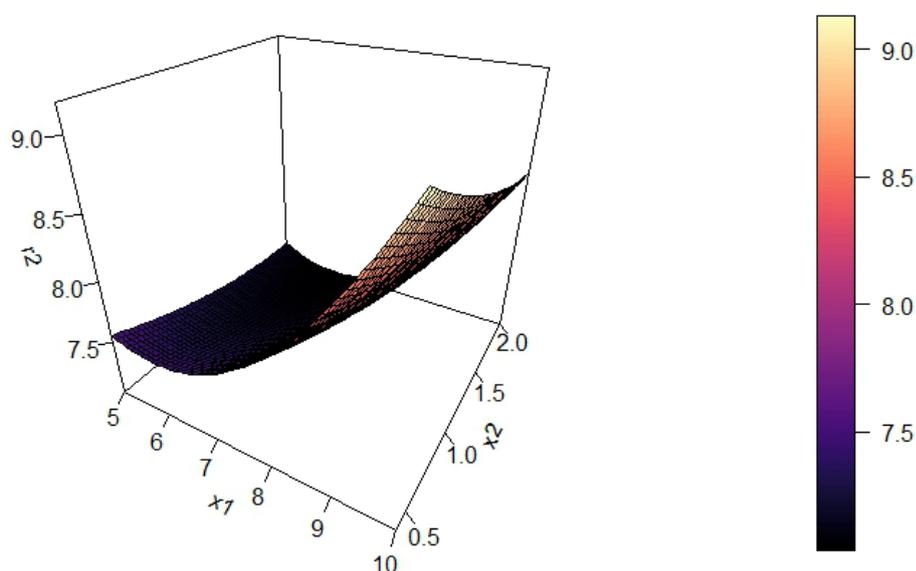


Рис. 5. – Поверхность зависимости r_2 от x_1 и x_2

Контрольный состав (без добавок) показал следующие результаты: предел прочности при сжатии $r_1=28,5$ МПа, предел прочности при изгибе $r_2=5,8$ МПа и среднюю плотность $\rho_l=2,05$ г/см³. Модифицированный бетон

продемонстрировал прирост предела прочности при сжатии на 67%, что составляет 47,72 МПа.

На рис. 5 и 6 приведены визуализации зависимости предела прочности при изгибе и средней плотности от тех же предикторов.

Как следует из графика поверхности, приведенного на рис. 5 тенденция увеличения предела прочности при изгибе, наблюдается при высоких расходах метаксаолина и суперпластификатора.

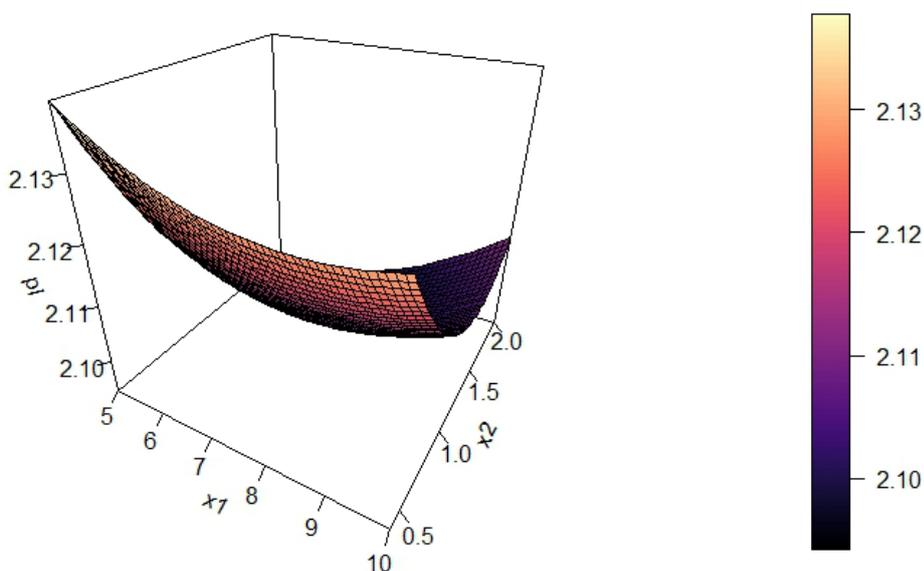


Рис. 6. – Поверхность зависимости p_1 от x_1 и x_2

В случае графика поверхности, для средней плотности модифицированного МЗБ наибольшие значения средней плотности достигаются при наименьшем расходе суперпластификатора, при увеличении его расхода средняя плотность МЗБ уменьшается. Увеличение расхода метаксаолина приводит к незначительному снижению средней плотности.

Полученные результаты демонстрируют, что применение комплексной трехкомпонентной добавки в МЗБ на мелком песке позволяет существенно улучшить и в случае необходимости регулировать его физико-механические свойства. Прочность при сжатии в модифицированных составах увеличилась от 29,86 до 47,72 МПа, что составляет 4,7-67%, по сравнению с контрольным составом (28,5 МПа), и согласуется с литературными данными о синергети-

ческом эффекте добавок [6, 7]. Прочность при изгибе возросла до 6,3-9,2 МПа, что составляет 8,6-58,6%, а средняя плотность увеличилась до 2,07-2,14 г/см³, что составляет 0,97-4,39% и указывает на уплотнение структуры матрицы за счет пуццолановой активности метакеолина и снижении водоцементного отношения суперпластификатором [4, 8].

Механизм действия добавок подтверждается их физико-химическими свойствами. Метакеолин, благодаря высокой удельной поверхности и содержанию аморфного SiO₂ и Al₂O₃, способствует образованию дополнительных C-S-H-гелей, уплотняя цементный камень и снижая пористость на 10-20% [3, 9]. Суперпластификатор, поликарбоксилатного типа диспергирует цементные частицы, обеспечивая снижение водоцементного отношения на 20-30%, и увеличивает подвижность бетонной смеси, что особенно важно для мелкого песка с высокой адсорбцией воды [8]. Ускоритель твердения способствует ускорению гидратации клинкерных фаз и увеличивает раннюю прочность на 50-100% в первые сутки, что находит подтверждение в других исследованиях [13].

Полиномиальная регрессионная модель второй степени для предела прочности при сжатии показала высокую объясняющую способность. Это указывает на достаточную способность модели описывать вариации прочности в данном диапазоне факторов. Сравнение с работами, использующими факторный дизайн для разработки МЗБ [17], показывает, что высокая R² может быть обусловлена достаточным объемом выборки и наличием значимых взаимодействий, которые были оставлены в процессе их пошагового отбора. Это подтверждается работами [15, 16], где аналогичные модели демонстрируют R²>0,7, только при включении дополнительных факторов.

Наибольший прирост прочности при сжатии наблюдается при высоких дозировках метакеолина (10%) и суперпластификатора (1,2-2,0%), что подтверждается максимумами r₁ в опытах 9 (47,42 МПа, при x₁=5%, x₂=2%,

$x_3=1,5\%$) и 12 (47,72 МПа, при $x_1=10\%$, $x_2=1,2\%$, $x_3=2\%$). Трехмерная поверхность отклика (см. рис. 4) показывает параболическую зависимость r_1 от x_1 и x_2 , с минимумом около 32,8 МПа при $x_1 \approx 7,5\%$, $x_2 \approx 1,2\%$, что согласуется с квадратичными элементами модели. Это указывает на нелинейный эффект действия добавок: высокие дозировки метакаолина усиливают пуццолановую реакцию, а суперпластификатор оптимизирует реологию, но их избыток может приводить к перерасходу без пропорционального роста прочности [14].

Отсутствие значимых взаимодействий (x_1x_3 , x_2x_3) в модели может быть связан со спецификой мелкого песка, который нивелирует синергетические эффекты за счет высокой адсорбции. В российских исследованиях [2, 10] подчеркивается, что мелкий песок с модулем крупности $M_k < 1,5$ требует точной балансировки расхода добавок, чтобы избежать сегрегации, что подтверждает наши наблюдения.

Все три коэффициента линейных эффектов положительны. Это означает, что при увеличении любой из независимых переменных (при условии, что остальные не изменяются и не учитываются нелинейные эффекты), значение предела прочности при сжатии растет. В данном случае наибольшее влияние оказывает расход метакаолина, затем расход суперпластификатора и наименьшее расход ускорителя твердения. Нелинейный эффект от расхода метакаолина положительный, но очень мал, что указывает на слабый ускоряющий рост предела прочности при сжатии при увеличении расхода метакаолина. Однако из-за малой величины этим эффектом, можно пренебречь. Нелинейные эффекты расхода суперпластификатора и ускорителя твердения имеют отрицательный коэффициент, что говорит о том, что связь предела прочности при сжатии с ними является нелинейной и вогнутой. С увеличением расхода суперпластификатора (или ускорителя твердения) предел прочности при сжатии растет, но после достижения определенной точки (оптимума)

дальнейшее увеличение расхода суперпластификатора (или ускорителя твердения) приводит к снижению предела прочности при сжатии – эффект «убывающей отдачи». Эффект взаимодействия расхода метаксаолина и суперпластификатора имеет отрицательный коэффициент, из чего следует, что влияние переменной расход метаксаолина на предел прочности при сжатии зависит от уровня переменной расход суперпластификатора и наоборот. Высокие значения одной из этих переменных ослабляют положительное влияние другой на результат предела прочности при сжатии. Между расходом метаксаолина и расходом суперпластификатора существует антагонистический эффект.

Полученные составы с пределом прочности при сжатии более 40 МПа (например, $x_1=10\%$, $x_2=1,2\%$, $x_3=2\%$), для данной активности портландцемента пригодны для бетонных и железобетонных конструкций и изделий, где требуется высокая прочность и плотность. Уменьшение водоцементного отношения за счет суперпластификатора и частичная замена цемента метаксаолином (до 10%) повышает экологичность [13]. Экономическая эффективность достигается за счет использования местных мелких песков и оптимизации дозировок. Сравнение с подобными составами [15] показывает, что предложенный МЗБ пригоден для применения в производстве сборного железобетона и 3D-печати, где важна текучесть и ранняя прочность.

Полученные нами результаты согласуются с зарубежными исследованиями [13, 16], в которых предел прочности при сжатии МЗБ с метаксаолином и СП достигает 50-60 МПа при оптимизированных составах. Однако российские работы [6, 14] подчеркивают важность учета гранулометрии песка, что в нашем случае ограничило максимальную прочность из-за высокой доли фракций менее 0,63 мм. В отличие от работы [8], где сделан акцент на ускорителях для ранней прочности, ускоритель твердения, использованный нами, показал более слабый эффект ($p=0,868$), что может быть связано с его хими-

ческим составом и требует его замены на более эффективные, подобные использованным в работе [13], либо низкой активностью и минералогическим составом использованного портландцемента.

В целом, исследование подтверждает потенциал трехкомпонентной добавки, однако требует проведение дальнейших исследований по оптимизации ее состава для достижения устойчивых результатов в производственных условиях.

Проведенное исследование позволило разработать состав мелкозернистого бетона на мелком песке, модифицированного комплексной трехкомпонентной добавкой, включающей метакаолин, суперпластификатор и ускоритель твердения. Основные результаты подтверждают эффективность предложенной комплексной добавки в улучшении основных физико-механических свойств материала. Максимальное значение прочности при сжатии составило 47,72 МПа, прирост составил 67%, по сравнению с контрольным составом (28,5 МПа), при изгибе – 9,2 МПа, прирост составляет – 58,6 %, а средней плотности 2,14 г/см³, прирост – 4,4%, что подтверждает их синергетическое влияние на уплотнение структуры и снижение водоцементного отношения.

Полученная нами полиномиальная регрессионная модель второй степени – статистически значима, она выявила квадратичную зависимость предела прочности при сжатии от исследованных факторов, с высокой объясняющей способностью ($R^2 = 0,8856$) и ее можно использовать для анализа предела прочности при сжатии в рамках исследуемых данных. Взаимосвязи модели сложные, т.к. простые линейные зависимости не отражают полной картины, а наличие квадратичных членов и взаимодействия указывают на необходимость более тонкого анализа. Переменные x_2 и x_3 имеют оптимальные значения, однако для них существует наилучшее значение, при котором предел прочности при сжатии достигает максимума, а превышение этих значений ведет к снижению прочности, впрочем, как и их уменьшение. Перемен-

ные x_1 и x_2 конкурируют друг с другом, для достижения наилучшего результата их нельзя максимизировать одновременно, необходимо искать баланс.

Полученные составы пригодны для применения в производстве сборных железобетонных изделиях и монолитных конструкциях, а также потенциально в аддитивных технологиях, благодаря улучшенной текучести и ранней прочности. Составляющая экологической эффективности может быть достигнута за счет частичной замены цемента метакаолином, что приведет к снижению углеродного следа на 5-10%. Экономическая выгода обусловлена использованием местных песков и оптимизацией дозировок добавок.

Перспективы дальнейших исследований включают: расширение экспериментального плана, исследование долговременных свойств (морозостойкость, усадка) и замену ускорителя твердения на более эффективный. Примененный подход с использованием математического моделирования в R может быть масштабирован для других типов бетонов и добавок, способствуя развитию экологичных и высокопрочных материалов в строительстве.

Литература

1. Neville A.M. Properties of Concrete. 5th ed. Pearson Education Limited. 2011. 872 p.
2. Базанов С.М. Мелкозернистый бетон: свойства и применение в строительстве // Строительные материалы. 2018. №6. С. 12-18.
3. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. №114. pp. 2-26.
4. Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В. Самоуплотняющиеся бетоны: современные подходы к составу // Бетон и железобетон. 2017. №5. С. 22-29.
5. Соколов П.Э., Землянский Д.П., Власов М.А., Леонтьев В.С., Карапузов В.И. Разработка состава мелкозернистого бетона на некондиционных компо-



нентах с применением комплексной модифицирующей добавки // Инженерный вестник Дона, 2024, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9174/.

6. Корнеев В.И., Зайцев Ю.В. Модифицирующие добавки в технологии бетонов // Вестник ТГАСУ. 2020. №22(3). С. 45-53.

7. Siddique R., Khan M.I. Supplementary Cementing Materials. Springer. 2011. P. 212.

8. Aitchin P.-C., Flatt R.J. Science and Technology of Concrete Admixtures. Woodhead Publishing. 2015. P. 666.

9. Juenger M.C., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete // Cement and Concrete Research. 2015. №78. pp. 71-80. DOI.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018

10. Лесовик В.С., Гридчин А.М. Экологически безопасные бетоны на основе местных материалов // Экология и промышленность России. 2019. №23(4). С. 10-15.

11. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны: теория и практика. М. Астра семь. 1998. 768 с.

12. Соколов П.Э., Лупиногин В.В., Толочёк Т.В., Темуркаев М.А., Карапузов В.И. Повышение эффективности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах с помощью комплексной добавки // Инженерный вестник Дона, 2025, №6. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2025/10146/

13. Wang D., Shi C., Wu Z. Effects of chemical admixtures on the working mechanism of sodium silicate-based alkali-activated slag // Journal of Building Engineering. 2019. №25, 100781. DOI.org/10.1016/j.jobe.2019.100781

14. Гридчин А.М., Лесовик Р.В. Технология мелкозернистых бетонов с применением комплексных добавок // Строительные материалы. 2022. №8. С. 30-36.

15. Соколов П.Э. Результаты исследования влияния комплексной добавки на скорость набора прочности и прочность мелкозернистого бетона // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. №2. С. 1-14.

16. Zhang Y., Zhang J., Jiang J. 3D printed concrete with fine recycled sand: Mechanical properties and workability // Construction and Building Materials. 2020. №262. 120077

17. Box G.E.P., Draper N.R. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. 2nd ed. Wiley. 2007. 880 p.

References

1. Neville A.M. Properties of Concrete. 5th ed. Pearson Education Limited. 2011. 872 p.

2. Bazanov S.M. Stroitel'nye materialy. 2018. №6. Pp. 12-18.

3. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Cement and Concrete Research. 2018. №114. P. 2-26.

4. Falikman V.R., Sorokin Yu.V. Beton i zhelezobeton. 2017. №5. Pp. 22-29.

5. 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/.

6. Korneev V.I., Zaytsev Yu.V. Vestnik TGASU. 2020. №22 (3). Pp. 45-53.

7. Siddique R., Khan M.I. Supplementary Cementing Materials. Springer. 2011. P. 212.

8. Aitchin P.-C., Flatt R.J. Science and Technology of Concrete Admixtures. Woodhead Publishing. 2015. P. 666.

9. Juenger M.C., Siddique R. Cement and Concrete Research. 2015. №78. pp. 71-80. DOI.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018

10. Lesovik V.S., Gridchin A.M. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2019. №23 (4). Pp. 10-15.



11. Batrakov V.G. Modifitsirovannye betony: teoriya i praktika. [Modified concretes: theory and practice]. M. Astra sem'. 1998. 768 p.
12. Sokolov P.E., Lupinogin V.V., Tolochev T.V., Temurkaev M.A., Karapuzov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №6. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2025/10146/
13. Wang D., Shi C., Wu Z. Journal of Building Engineering. 2019. №25, 100781. DOI.org/10.1016/j.jobe.2019.100781
14. Gridchin A.M., Lesovik R.V. Stroitel'nye materialy. 2022. №8. Pp. 30-36.
15. Sokolov P.E. Vestnik evraziyskoy nauki. 2024. T. 16. №2. Pp. 1-14.
16. Zhang Y., Zhang J., Jiang J. Construction and Building Materials. 2020. №262. 120077
17. Box G.E.P., Draper N.R. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. 2nd ed. Wiley. 2007. 880 p.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 15.01.2026

Дата публикации: 28.02.2026