

ДЖУСУПОВА М.А., ТАЛАНТБЕК К. АЙДАЙ.
¹КГУСТА им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

DZHUSUPOVA M.A., TALANTBEK K. AIDAI.
¹KSUCTA n.a. N. Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic
dzmahavat@gmail.com ayday-talantbekova@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ДИССОЦИАТИВНО-ШАГОВЫМ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ

PREDICTION OF THE PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETE BY THE DISSOCIATIVE-STEP OPTIMIZATION METHOD

Бул макала күл шлак калдыктарын колдонуу маселесине арналган. Майда дандуу бетондун бекемдик касиеттерин, катуулануусунун ар кандай мөөнөттө өтүшү оптималдаштыруунун диссоциативдик кадам усулун колдонуу менен болжонгон. Төмөн маркалуу цементти алууда майда дандуу бетондун талаптагыдай бышыктыгын камсыз кылуу үчүн күл шлак калдыктарын кошуу менен аларды 1,5 саат ичинде майдалаганда алынаары көрсөтүлөт.

Өзөк сөздөр: бекемдик, төмөн маркалуу цемент, күл шлак калдыктары, оптимизация, майда дандуу бетон.

Статья посвящена проблеме использования золошлаковых отходов. Прогнозирование прочностных свойств в разные сроки твердения мелкозернистого бетона осуществлялось диссоциативно-шаговым методом оптимизации. Показано, что требуемая прочность мелкозернистого бетона на низкомарочном цементе с использованием золошлаковых отходах обеспечивается только при из совместном измельчении в течении 1,5 часа.

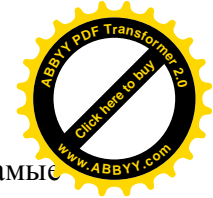
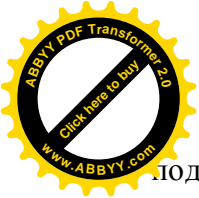
Ключевые слова: прочность, низкомарочный цемент, золошлаковые отходы, оптимизация, мелкозернистый бетон.

The article is devoted to the problem of using ash and slag waste. The prediction of strength properties in different periods of hardening of fine-grained concrete was carried out by the dissociative-step optimization method. The prediction of strength properties in different periods of hardening of fine-grained concrete was carried out by the dissociative-step optimization method. It is shown that the required strength of fine-grained concrete on low-grade cement using ash and slag waste is provided only when it is combined with grinding for 1.5 hours.

Key words: strength; low-grade cement; ash and slag waste; optimization; fine-grained concrete.

Введение. Развитие строительной отрасли в Кыргызстане способствует росту потребления сырьевых ресурсов. Запасы природного сырья не безграничны и на современном этапе развития промышленности строительных материалов необходимо изыскивать все возможности для рационального природопользования, использования некондиционного и техногенного сырья, при этом уделять особое внимание экологическим аспектам.

При строительстве объектов различного назначения наиболее целесообразно использовать эффективные мелкозернистые бетоны (МЗБ), обладающие рядом преимуществ по сравнению с обычным щебеночным бетоном. Отсутствие крупного заполнителя придает ему однородную структуру, большую плотность, хорошую удобоукладываемость и



подвижность бетонной смеси, которая способна проникать при заливке в самые труднодоступные места или густоармированные элементы конструкций.

Несмотря на очевидные преимущества, использование МЗБ ограничено в связи с повышенным расходом цемента. Возможность достижения требуемых характеристик МЗБ с оптимальным содержанием цемента обеспечивается даже при «разбавлении» вяжущего дисперсными частицами минеральной добавки. То есть при снижении количества цемента дефицит дисперсных частиц будет компенсирован наличием минеральной добавки. В дополнении к физическому эффекту наполнения цемента дисперсные активные минеральные добавки могут проявлять химическую активность. В частности, кислые зольные топливные отходы способны проявлять пуццоланическую активность в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который является продуктом гидратации цемента и образуется дополнительное количество гидросиликатов Са в структуре микробетона [1].

Запасы ЗШО постоянно возрастают и остаются невостребованными долгие годы. Только в столице из 134 котельных 54 работают на угле, а небольшие котельные в республике порядка 2500 производят тепловую энергию для зданий, не подключенных к централизованному теплоснабжению. Улучшение экологической ситуация в крупных городах и регионах Кыргызстана связано с решением проблем утилизации ЗШО.

Очевидно, что использование цементных вяжущих с минеральными добавками в виде ЗШО может отрицательно сказаться на физико-механических характеристиках бетона. И в каждом конкретном случае необходима предварительная экспериментальную апробация. Исследования ЗШО в качестве добавок в цемент показали, что при наполнении до 30% исходная прочность цемента (М 400) практически равнозначна, а при 50% у вяжущих активность снижается до М 300 [2].

В технологии бетона мировая практика показала высокую эффективность использования суперпластификаторов на базе поликарбоксилатов. В отличие от классических механизм их действия основан на взаимодействии сил пространственного и электростатического отталкивания между компонентами бетонной смеси. Это позволяет улучшить реологические свойства бетонных смесей, снизить временные, материальные и энергетические ресурсы [3].

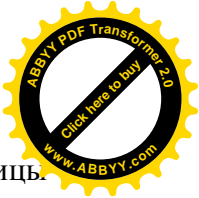
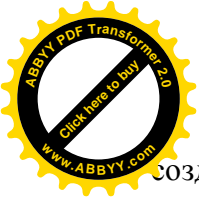
Целью исследований является оптимизация рецептуры и прочностных свойств мелкозернистого бетона для малоэтажного строительства на низкомарочных цементах с использованием золошлаковых отходов.

Методы и материалы. Золошлаковые смеси (ЗШС) соответствуют ГОСТ 25592-91 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов» и относятся к кислым с химическим составом: SiO_2 - 52,09%; Al_2O_3 - 20,0%; Fe_2O_3 - 2,23; CaO - 5,74; несгоревшие частицы 11%. Фракционный состав представлен шлаком фракции 5-20 мм (50%), где доминирующей является стеклофаза, обуславливающая активность, зольной составляющей (40%) и пылевидной золой до 10%. Минералогический состав представлен стеклофазой и кристаллическими образованиями кварца, муллита, кальцита, магнетита, C_2S , CA .

Поскольку получение МЗБ для малоэтажного строительства на высокомарочных цементах является не эффективным и неоправданным, то для исследований был использован цемент не соответствующий заявленному качеству Д20М400 активностью 21,68 МПа. Это связано либо с нарушением правил транспортировки или условий и длительности хранения цемента и можно отнести к низкомарочным.

Композиционное вяжущее (ЦЗШВ) представляет собой смесь низкомарочного цемента и предварительно высушенная и просеянная ЗШС, которая измельчалась в шаровой мельнице в течении 1,5 часа. Совместный помол цемента с ЗШС обеспечивает усреднение гранулометрического и минералогического состава вяжущего, активацию зольной составляющей, повышение однородности, снижение водопотребности и соответственно повышение прочности и долговечности цементнозольного камня [2].

Мелкий заполнитель - песок Аламединского месторождения с модулем крупности 3,26. Химическая добавка – поликарбоксилат эфирный суперпластификатор MasterGlenium 116



создан для производства товарного бетона и позволяет отсрочить абсорбцию воды в частицы цемента, и равномерно распределить их по всему объему смеси.

Результаты исследования. Для реализации эксперимента выбран трех факторный по план В₃ с переменными: вяжущее с содержанием ЗПС, $X_1 = 30 \pm 20\%$; количество вяжущего, $X_2 = 350 \pm 50$ кг на 1 м^3 бетона и количество химической добавки Глениум 116, $X_3 = 1,0 \pm 0,2$ % от массы вяжущего. Мелкий заполнитель песок – остальное.

Контролируемыми параметрами качества МЗБ служили: прочность в 7, 14 и 28 суточном возрасте, плотность, и водопоглощение и В/В (водовязущее отношение). Распływ конуса регулировался в пределах 106-115 мм.

Выходными параметрами качества МЗБ служили: прочность на сжатие $R_{сж}$ и при изгибе $R_{изг}$ через 7, 14, 28 суток и 3 месяца, плотность $\rho^{28сут}$ и водопоглощение W . Критерием оптимизации выбрана прочность МЗБ после 28 суток твердения в нормальных условиях $R^{28сут}_{сж} > 20$ МПа.

Таблица 1 - Коэффициенты экспериментально-статистических моделей свойств МЗБ

№	Свойства МЗБ	Коэффициенты моделей									
		Нулевой	линейные			квадратичные			взаимодействия		
			b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}
1	$R^{7сут}_{изг}$	4,82	-1,12	1,21	-0,87	-0,86	1,11	0	0,14	0,46	0,15
2	$R^{14сут}_{изг}$	6,93	-0,94	1,45	-0,08	-0,8	-0,36	0,16	-0,81	-0,07	0,45
3	$R^{28сут}_{изг}$	8,0	-1,52	1,17	0,66	0,22	0,18	0,24	-0,31	-0,51	0,21
4	$R^{3мес}_{изг}$	10,58	-2,09	0,88	0,53	0,33	-0,36	0,37	-0,53	0,2	0,26
5	$R^{7сут}_{сж}$	6,01	-0,82	3,73	0,27	0,91	2,51	-0,01	-2,05	-0,57	0,16
6	$R^{14сут}_{сж}$	11,85	1,44	1,97	0,67	-2,03	2,49	-1,86	1,02	-0,4	-0,1
7	$R^{28сут}_{сж}$	14,89	-2,06	2,26	0,95	-2,08	2,27	0,12	0,87	1,74	0,52
8	$R^{3мес}_{сж}$	17,56	-2,29	2,17	-0,42	-2,97	2,68	0,75	1,02	0,78	-0,82
9	$\rho^{28сут}$	2405	-37,7	-13,8	-17,7	-28,0	9,34	-53	-18,3	16,8	6,3
10	W	3,41	0,61	-0,51	-0,11	0,37	0,17	-0,13	-0,83	-0,15	-0,15

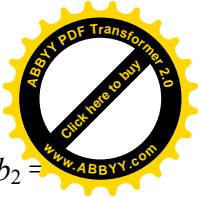
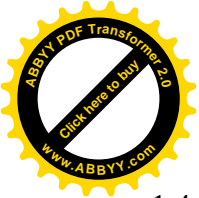
Результаты эксперимента позволили рассчитать коэффициенты регрессии экспериментально-статистических моделей второго порядка свойств МЗБ (табл. 1).

Кроме того, во всех 15 опытных точках эксперимента определялся коэффициент размягчения (K_p), который менял свое значение в зависимости от состава от 0,9 до 1,9.

Согласно классификации высокопрочные камни с $K_p = 0.9 - 1.0$ относят к водостойким и МЗБ может быть использован для изготовления стеновых материалов.

Для всех 15 точек плана эксперимента для бетонных смесей с распływ конуса выдерживался 106-115 мм и водовязущее отношение колебалось в пределах 0,5...0,71.

Предварительный анализ линейных эффектов моделей установил падение прочности образцов МЗБ при повышении наполнителя ЗПС в цементы (X_1). На что указывает знак «-» и для $R^{7сут}_{изг}$ коэффициент $b_1 = -1,12$, для $R^{14сут}_{изг}$ $b_1 = -0,94$ и $R^{28сут}_{изг}$ коэффициент $b_1 = -1,52$. Данные показатели компенсируются количеством вяжущего (X_2) при его максимальном количестве ($x_2 = +1$) в бетоне 400 кг на 1 м^3 . Линейный эффекты имеют знак «+».



Для прочности $R^{7cym}_{изг}$ линейный эффект составил $b_2 = 1,208$, для $R^{14cym}_{изг}$ эффект $b_2 = 1,44$ и для прочности $R^{28cym}_{изг}$ $b_2 = 1,17$. Химическая добавка (X_3) прямого влияния на прочность бетона не оказывает, но количество суперпластификатора X_3 Глениум 116 должно быть на оптимальном уровне. Та же тенденция изменения прочности на сжатие при изменении факторов X_1 и X_2 . В модели $R^{7cym}_{сж}$ линейный эффект $b_1 = -0,82$, для $R^{14cym}_{сж}$ $b_1 = -1,44$ и для $R^{28cym}_{сж}$ $b_1 = -2,06$. При факторе X_2 линейный эффект для прочности $R^{7cym}_{сж}$ составил $b_2 = 3,73$, для $R^{14cym}_{сж}$ $b_2 = 1,97$ и для $R^{28cym}_{сж}$ коэффициент $b_2 = 2,26$. Положительное влияние на прочность МЗБ оказывает второй фактор X_2 - количество вяжущего ЦЗШВ.

Для оперативного решения инженерных задач по экспериментально-статистическим моделям наиболее простым и наглядным способом для всех квадратичных моделей является диссоциативно – шаговый метод оптимизации (ДШМ) [4]. На рис. 1 представлена схема поиска оптимальных значений трех факторов для обеспечения максимальной прочности МЗБ на сжатие $R^{28cym}_{сж} > 20$ МПа.

Оптимальные значения факторов X_1 – содержание наполнителя ЗПС, X_2 - количество вяжущего и X_3 - количество суперпластификатора Глениум 116 для обеспечения максимальной прочности МЗБ $R^{28cym}_{сж}$ более точно можно определить воспользовавшись методом ДШМ [4].

Алгоритм поиска максимального значения прочности МЗБ выполняется в несколько этапов (рис.1). Во-первых, при анализе модели (1) установлено, что наибольшее влияние на прочностные характеристики МЗБ оказывает второй фактор, т.е. количество ЦЗШВ. Поэтому первый шаг оптимизации начинался с фактора x_2 . Проверка условий (a) и (b) показала необходимость оценки двух конкурирующих моделей, полученных подстановкой в модель (1) значений $x_2 = -1$ и $x_2 = +1$. При подстановке в модель (1) значений $x_2 = -1$ получена двухфакторная модель (2), а при подстановке в модель (1) значения $x_2 = +1$ получена двухфакторная модель (3)

Следующий шаг. Для каждой из полученных конкурирующих моделей (2) и (3) также проверяются условия (c) и (d), которые указывают на наличие экстремальных значений первого фактора по формуле $x_{1ext} = -b_1 : 2 b_{11}$. Для двухфакторной модели (2) расчетное значение $x_{1ext} = -0,7$ и для модели (3) значение составило $x_{1ext} = -0,28$. При подстановке значения $x_{1ext} = -0,7$ в модель (2) она трансформируется в однофакторную модель (4), а при подстановке значения $x_{1ext} = 0,28$ в модель (3), она переходит в модель (5).

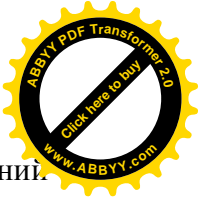
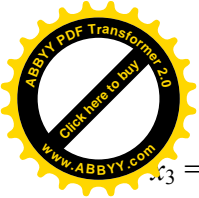
Далее для конкурирующих однофакторных моделей также проверяются условия (e) и (f) после оценки которых значение третьего фактора в обоих случаях должно находиться на нижнем уровне $x_3 = -1$. Затем подстановкой значения $x_3 = -1$ в модель (4) и (5) находят значения прочности МЗБ $R^{28cym}_{сж}$.

На последнем шаге оценивают результаты поиска максимума по модели (1), которые имеют два значения $R^{28cym}_{сж} = 16,29$ МПа и $R^{28cym}_{сж} = 20,7$ МПа. Единственно максимальное значение прочности МЗБ $R^{28cym}_{сж} = 20,7$ МПа соответствует критерию оптимизации. В данном случае для обеспечения $R^{28cym}_{сж} > 20$ МПа оптимальные значения трех факторов должны быть на уровнях: $x_1 = -0,28$; $x_2 = +1$ и $x_3 = -1$.

Перевод нормализованных переменных в натуральные по формуле $X_i = x_i \times \Delta X + X_{0i}$ позволит определить оптимальную рецептуру МЗБ, где количество наполнителя ЗПС составляет $X_1 = 24,4\%$, количество композиционного цементнозолошлакового вяжущего $X_2 = 400$ кг/м³, а содержание суперпластификатора: Глениум 116 должно быть $X_3 = 0,8\%$.

Следующий этап определения значений остальных характеристик МЗБ заключается в подстановке найденных по ДШМ оптимальных значений трех факторов ($x_1 = -0,28$; $x_2 = +1$ и $x_3 = -1$) в рассчитанные ранее модели (табл. 1).

На рисунке 2 визуально можно проследить изменение прочности МЗБ $R^{28cym}_{сж}$ при одновременном изменении трех рецептурных параметров, выбранных выше. Здесь видно, что имеется область рецептур, где прочность МЗБ соответствует критерию $R^{28cym}_{сж} > 20$ МПа. Поэтому для сравнения рассмотрен второй вариант, где количество наполнителя из ЗПС увеличено до 30 % и рецептура МЗБ соответствует значениям трех факторов $x_1 = 0$, $x_2 = +1$ и



$\mu_3 = -1$. Подставив данные значения факторов в модели (табл. 1) получен 2 вариант значений свойств МЗБ.

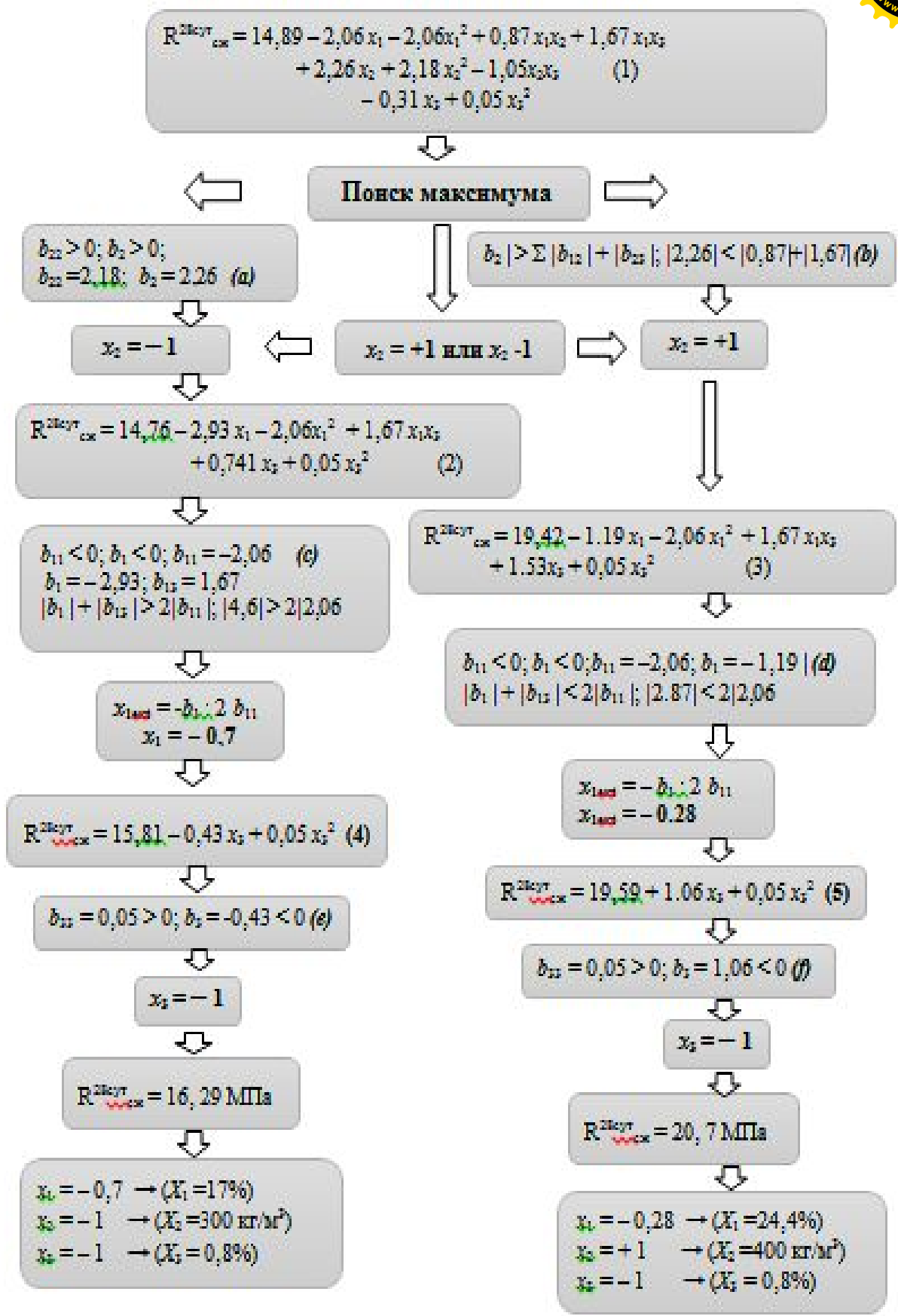


Рис. 1. Схема поиска прочности МЗБ на сжатие $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} > 20 \text{ МПа}$ диссоциативно-шаговым методом

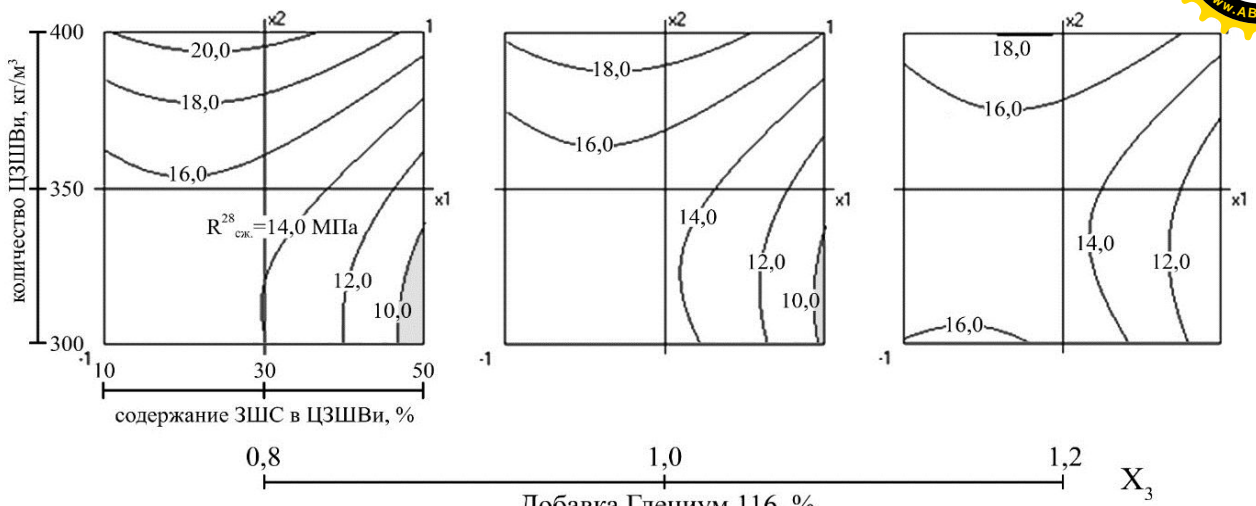
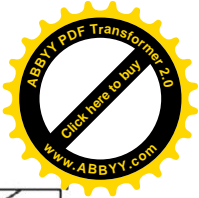


Рис. 2. Изолинии прочности МЗБ $R^{28сут}_{сж} = f(x_1, x_2, x_3)$

В таблице 2 показаны расчетные значения прочности МЗБ на 7, 14, 28 суток и 3 месяца твердения для двух вариантов рецептур.

Таблица 2 - Значения свойств МЗБ при 2-х вариантах рецептуры

№ пп	Свойства МЗБ	1 вариант $x_1 = -0,28; x_2 = 1;$ $x_3 = -1$	2 вариант $x_1 = 0; x_2 = 1;$ $x_3 = -1$
1	$R^{7сут}_{изг}$, МПа	8,06	7,73
2	$R^{14сут}_{изг}$, МПа	8,19	7,8
3	$R^{28сут}_{изг}$, МПа	8,99	8,61
4	$R^{3мес}_{изг}$, МПа	20,8	20,0
5	$R^{7сут}_{сж}$, МПа	10,14	10,19
6	$R^{14сут}_{сж}$, МПа	14,05	13,9
7	$R^{28сут}_{сж}$, МПа	20,7	20,6
8	$R^{3мес}_{сж}$, МПа	20,8	20,0
	$\rho^{28сут}$, кг/м³	2228	2195
	W, %	3,2	3,15

На диаграммах (рис. 1 и 2) показано, что «разбавление» низкомарочного цемента до 30 % золошлаковой смесью обеспечивает получение равнозначных по прочности МЗБ и соответствуют критерию $R^{28сут}_{сж} > 20$ МПа.

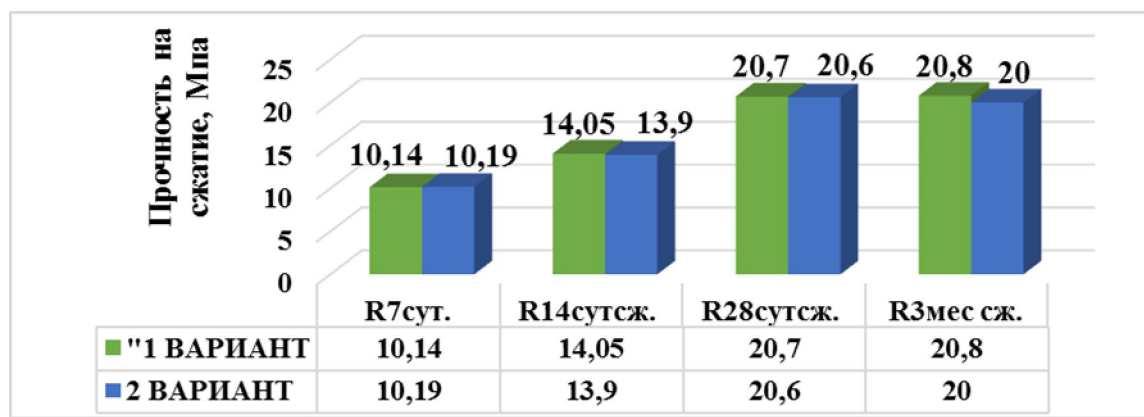




Рис. 3. Прочность на сжатие МЗБ на 7, 14, 28 сутки и 3 месяц твердения

Известно, что особенностью цементозольных вяжущих и материалов на их основе является их повышенная прочность на растяжение при изгибе по сравнению с цементоминеральными материалами. При одинаковой марке (прочности при сжатии) зольные вяжущие имеют выше значения $R_{изг}$, чем портландцемент. Для портландцемента, согласно ГОСТ 10178-85, это соотношение изменяется от 0,15 до 0,11. Повышенная прочность на растяжение при изгибе способствуют снижению вероятности появления трещин в золоцементных материалах при переменных температурах [1].

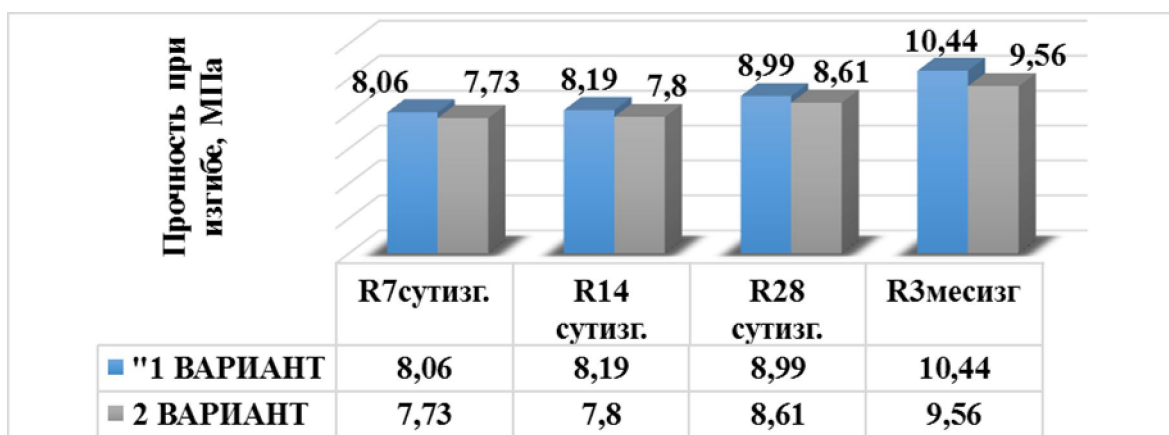


Рис. 4. Прочность при изгибе МЗБ на 7, 14, 28 сутки и 3 месяц твердения

При анализе прочностных свойств МЗБ на основе вяжущего ЦЗШВ наблюдается повышенная прочность на изгиб по сравнению с бетонами на цементном вяжущем (рис.3, 4). По рассчитанным моделям прочности МЗБ на 28 сутки определено отношение $R^{28сут}_{изг} / R^{28сут}_{сж}$ на нулевой точке, которое составило $8,0/14,89 = 0,54$.

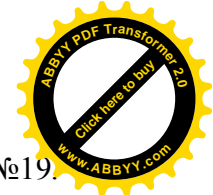
Выводы: Таким образом, решение технологической задачи для обеспечения требуемой прочности МЗБ диссоциативно-шаговым методом оптимизации, позволило расчетным способом прогнозировать все остальные его показатели.

Установлены оптимальные значения трех рецептурных факторов: количество наполнителя из ЗШС – 20...30%, цементнозолошлакового вяжущего 400 кг/м^3 и суперпластификатора Глениум 116 для обеспечения прочности МЗБ $R^{28сут}_{сж} > 20 \text{ МПа}$. Прочность по истечении 3-х месяцев не изменилась и учитывая пуццоланическую активность ЗШС она будет медленно нарастать длительное время.

Показана возможность использования низкомарочного цемента, «разбавленного» золошлаковыми отходами, но при условии их совместного измельчения не менее 1,5 часа, что позволит расширить сырьевую базу строительной индустрии и решить актуальные проблемы охраны окружающей среды.

Список литературы

1. Дворкин Л. И. Эффективность цементов с минеральными добавками в бетонах [Текст] / О.Л. Дворкин // Цемент и его применение. - С.-Петербург: 2002. - №2. - С. 41-49.
2. Джусупова М.А. Мелкозернистые бетоны на вяжущих и заполнителях из золошлаковых отходов [Текст] / М.А. Джусупова, С.Т. Кульшикова. - Вестник КГУСТА. - Бишкек: 2019. - №1 (63). - С.150-155.
3. Калашников В. И. Супер- и гиперпластификаторы. Микрокремнеземы. Бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности [Текст] /



В.И.Калашников В.М.Володин, М.Н. Мороз и др. // Молодой ученый. — 2014. — №19. С. 207-210.

4. Вознесенский В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, В.Н. Выровой, В.Я. Керш и др. —Киев: Будевельник, 1983. — 144 с.