

Оптимизация состава гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

*П.Э. Соколов, Д.М. Бажуков, Д.И. Солев, В.И. Каранузов,
Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

Аннотация: Исследовано влияние состава гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на его основные прочностные показатели. Целью проведенных исследований являлось определение такого расхода компонентов гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, который позволял бы получать максимальный предел прочности при сжатии, при условии минимального расхода портландцемента. В качестве компонентов гипсоцементно-пуццоланового вяжущего использовались строительный гипс, портландцемент и пуццолановая добавка наиболее распространенная в регионе. Исследования были проведены в соответствии с разработанным планом, а полученные результаты позволили рассчитать и проанализировать описательные статистики, выявить влияние компонентов на прочностные показатели гипсоцементно-пуццоланового вяжущего. В ходе анализа установлено, что положительное влияние на прочность гипсоцементно-пуццоланового вяжущего оказывает фактор расхода пуццолановой добавки и взаимодействие расходов строительного гипса и портландцемента. Получены математические модели влияния расходов компонентов гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на предел прочности при сжатии и изгибе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего. Данная модель позволяет прогнозировать состав гипсоцементно-пуццоланового вяжущего для получения требуемого предела прочности при сжатии. Проведена оптимизация и получен состав гипсоцементно-пуццоланового вяжущего с максимальным пределом прочности при сжатии, при условии минимального расхода портландцемента.

Ключевые слова: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, оптимизация состава, предел прочности, план эксперимента, описательные статистики, совмещенные диаграммы, коррелограмма, тренарная диаграмма.

В последние десятилетия гипсовые вяжущие находят все более широкое применение для производства сухих строительных смесей и различных видов строительных материалов [1, 2]. Разведанные запасы сырья для производства гипса в России превышают 300 млн. т [3, 4], что способствует их широкому использованию для производства материалов на основе гипсовых вяжущих. Гипсовые вяжущие вещества и материалы на их основе повсеместно применяются в строительстве в России, Китае, США, странах Западной Европы и в мире в целом.

Отработанная и постоянно совершенствующаяся технология производства гипсовых вяжущих, а также малая энергоемкость его получения (по сравнению с портландцементом) создают значимые

преимущества для конкуренции с портландцементом – основным гидравлическим вяжущим в строительной индустрии. Однако указанные преимущества нивелируются присущими гипсу недостатками, а именно низкой водо- и морозостойкостью, небольшой прочностью (особенно в условиях воздействия влаги), что существенно ограничивает области применения гипса в строительстве.

Одним из путей решения данной проблемы является рецептурная модификация гипсового вяжущего, а именно - использование его в составе смеси с портландцементом и активной минеральной добавкой, т.е. получение гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ) [5]. Такое использование гипса можно считать одним из наиболее эффективных способов повышения его прочностных показателей, водостойкости и т.п. Приоритетным и перспективным направлением в плане развития технологий производства строительных материалов считается разработка, внедрение в производство и дальнейшее совершенствование малоклинкерных и бесклинкерных вяжущих веществ.

Промышленное применение ГЦПВ получили во второй половине 50-х годов XX в. В СССР было налажено производство самого вяжущего и изделий из него [6]. Ввиду того, что ГЦПВ является многокомпонентным вяжущим, отдельные компоненты которого могут существенно различаться по составу не только у различных производителей, но и в разных партиях, постоянного уточнения требует состав ГЦПВ и поиск оптимального соотношения между его компонентами [7], которое как следствие оказывает существенное влияние на основные свойства готовой продукции [8].

Работы, проводимые различными исследователями направлены на разработку водостойких, гипсоцементно-пуццолановых вяжущих низкой водопотребности [9], использование пуццолановых добавок различных видов [10, 11], нанодобавок [12], а также целенаправленного регулирования

состава, для получения требуемой структуры материала [13, 14], помимо этого перспективны различные разведочные исследования, в т.ч. связанные с экологическими аспектами [15].

Цель данной работы заключается в разработке оптимального состава ГЦПВ по прочности, с использованием наиболее распространенных сырьевых материалов (компонентов) в регионе и изучение их прочностных свойств

При проведении данной работы были использованы следующие материалы:

- гипс строительный, марки Г- 4 Б-П. На момент проведения исследований вяжущее характеризовалось следующими показателями: нормальная плотность гипсового теста – 0,75; предел прочности при сжатии – 4,36 МПа; предел прочности при изгибе – 2,15 МПа;

- портландцемент марки ПЦ500 Д0 со следующими характеристиками:

- кремнеземсодержащий наполнитель – «Биокремнезем» - тонкодисперсный диоксид кремния биогенного происхождения. Насыпная плотность – 265 – 270 кг/м³. Химический состав, %: SiO₂ – 86,0; Al₂O₃ – 6,6; Fe₂O₃ – 2,9; K₂O – 1,37; MgO – 0,79.

Оценка предела прочностных свойств ГЦПВ осуществлялась в соответствии с ГОСТ 23789-2018. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. Образцы выдерживались в камере нормального твердения в течение 28 суток.

В основу экспериментов был положен симплекс-вершинный план эксперимента. Интервалы варьирования количества составляющих компонентов приведены в таблице №1.

Таблица № 1

Условия проведения эксперимента

Фактор		Уровни фактора, %		Интервал варьирования
натуральный	кодированный	+1	-1	
1	2	3	4	5
гипс	X1	0,50	0,65	0,075

Продолжение табл. № 1

1	2	3	4	5
портландцемент	X2	0,15	0,30	0,075
пуццолановая добавка	X3	0,2	0,35	0,075

Приготовление ГЦПВ заключалось в тщательном перемешивании взвешенных компонентов в сухом состоянии, в соответствии с планом проведения эксперимента (см. таблицу №2).

Таблица № 2

Результаты исследований (фрагмент)

№ п/п	Факторы			Отклики	
	X1	X2	X3	R _{сж(28)}	R _{изг(28)}
1	2	3	4	5	6
1.	0,575	0,150	0,275	10,03	3,40
2.	0,550	0,200	0,250	11,52	3,94
3.	0,500	0,225	0,275	9,81	3,51
4.	0,500	0,150	0,350	12,20	3,66
5.	0,500	0,300	0,200	9,17	3,54

Из приготовленного вяжущего изготавливались образцы-балочек размерами 40×40×160 мм, которые по окончании твердения подвергались испытаниям по определению предела прочности при изгибе и сжатии.

Смесь ГЦПВ состоящая из трех компонентов может быть представлена точкой в системе координат на треугольнике, определяемой тремя переменными (см. рис. 1). Сумма для каждой смеси равна 1, так что значения компонентов в каждой смеси интерпретируются как пропорции.

Анализ экспериментов для смесей представляет собой множественную регрессию со свободным членом, равным нулю. Основное ограничение заключается в том, что сумма всех компонентов должна быть постоянной – оно может быть реализовано в подгонке модели множественной регрессии, не включающей свободный член.

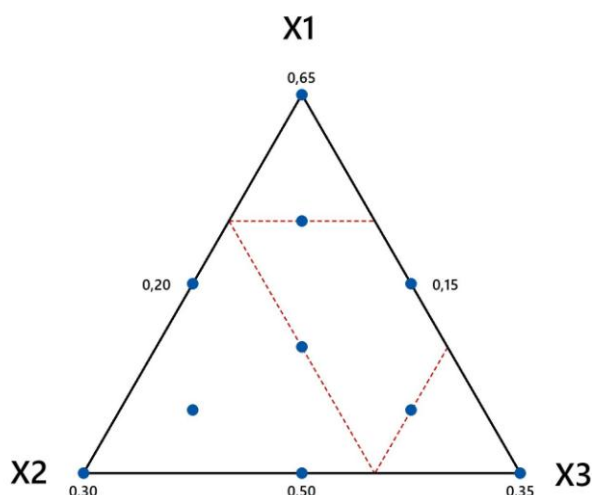


Рис. 1. Тренарная диаграмма количественного сочетания компонентов смеси
ГЦПВ

Анализ полученных данных (см. таблицу №2) проведем с помощью совмещенных («скрипичных») диаграмм, приведенных на рис. 2.

Как следует из диаграмм, минимальный предел прочности при сжатии составляет 9,17 МПа, а для изгиба 3,28 МПа (нижняя горизонтальная черная черта). Максимальный предел прочности при сжатии составляет 12,20 МПа, а при изгибе – 4,12 МПа (верхняя горизонтальная черная линия, ограничивающая закрашенную фигуру). Первый квартиль соответствует 10,19 МПа для предела прочности при сжатии и 3,43 МПа для предела прочности при изгибе (нижняя сторона черного прямоугольника). Значения медиан для предела прочности при сжатии – 11,12 МПа, а для изгиба – 3,60 МПа (белая точка на черном прямоугольнике). Средние значения – 10,92 МПа и 3,66 МПа, соответственно. Для третьего квартиля (верхняя сторона черного прямоугольника) значения составляют – 11,60 МПа и 3,92 МПа соответственно. Внешний контур раскрашенных фигур, синего цвета для предела прочности при сжатии и красного цвета для предела прочности при изгибе представляет собой симметричные диаграммы ядерной оценки функции плотности. Необходимо отметить небольшой сдвиг распределения

предела прочности при сжатии в отрицательную сторону, а для предела прочности при изгибе в положительную сторону (верхний «ус» на диаграмме длиннее нижнего).

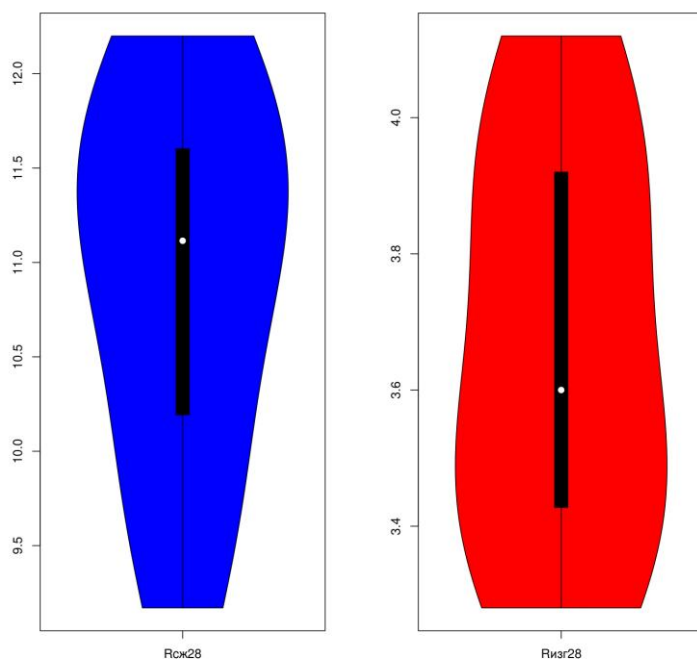


Рис. 2. Совмещенные диаграммы описательных статистик результатов исследования пределов прочности при сжатии и изгибе ГЦПВ

С помощью кореллограммы (матрицы корреляции) оценим степень линейной связи между переменными, полученными в результате проведения исследований (см. рис. 3). Оттенки цвета в нижнем треугольнике отражают силу и направление корреляций. Строки и столбцы переупорядочены в соответствии с результатами анализа методом главных компонент. В верхнем треугольнике выводятся коэффициенты корреляции.

Как следует из рис. 3 наибольшие положительные значения корреляции имеют место между расходом гипса и пределом прочности при изгибе, а также между пределом прочности при сжатии и при изгибе. Корреляция между расходом гипса и пределом прочности при сжатии по величине практически в два раза меньше, чем при изгибе. Минимальная

положительная корреляция отмечена между расходом пуццолановой добавки и пределом прочности при сжатии. Во всех остальных случаях имеет место отрицательная корреляция. Наибольшие величины отрицательной корреляции наблюдаются между: расходом гипса и расходом пуццолановой добавки; расходом гипса и расходом цемента; расходом цемента и пуццолановой добавки; расходом цемента и пределом прочности при сжатии. Наименьшие величины отрицательной корреляции отмечены между пределом прочности при изгибе и расходом пуццолановой добавки, а также расходом цемента. Таким образом, наибольшее влияние на прочностные показатели оказывает расход гипса.

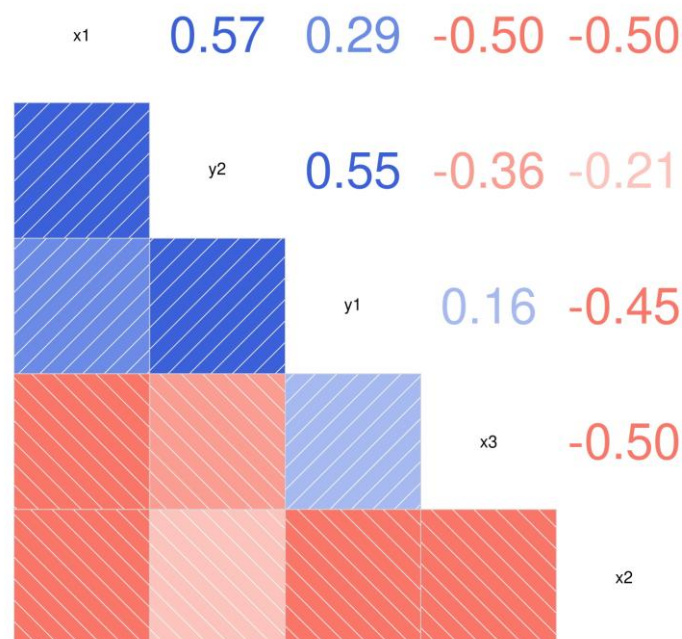


Рис. 3. Коррелограмма для корреляционной матрицы между исследованными переменными для ГЦПВ

Проведенные исследования позволили получить данные функции отклика, которые приведены в таблице №2. Анализ полученных данных и подбор модели позволяет нам определить значения факторов отражающих оптимальный состав ГЦПВ. В качестве предполагаемой модели была

принята модель квадратичной регрессии. Результаты анализа симплекс-вершинного плана для функции отклика предел прочности при сжатии ГЦПВ приведены в таблице №3.

Таблица № 3

Расчетные коэффициенты регрессии для $R_{сж(28)}$

Фактор, взаимодействие	Коэффициент	Коэффициент стандартной ошибки	T-критерий Стьюдента	P-уровень значимости
1	2	3	4	5
X1	-0,7	14,2	-	-
X2	-185,5	49,7	-	-
X3	145,0	44,9	-	-
X1·X2	417,0	103,0	4,03	0,016
X1·X3	-215,0	103,0	-2,08	0,106
X2·X3	-81,0	103,0	-0,78	0,478

Используя полученные в результате анализа значения вероятностей, оценим значимость влияний на предел прочности при сжатии. При $\alpha=0,05$ основные влияния и взаимодействие X1·X2 являются статистически значимыми, а взаимодействия X1·X3 и X2·X3 статистически не значимы. Однако, в целом полученная модель является значимой.

На основании данных, приведенных в таблице №3, можно представить функцию отклика для предела прочности при сжатии уравнением следующего вида:

$$\tilde{Y}_{сж(28)} = -0,7X_1 - 185,5X_2 + 145X_3 + 417X_1X_2 - 215X_1X_3 - 81X_2X_3 + 0,523, \quad (1)$$

где ε - отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых для функции отклика предел прочности при сжатии равна – 0,523.

Для функции отклика – предел прочности при сжатии уравнение будет иметь вид:

$$\tilde{Y}_{изг(28)} = 4,28X_1 - 26,6X_2 + 26,8X_3 + 61,8X_1X_2 - 44,2X_1X_3 - 15,8X_2X_3 + 0,313, \quad (2)$$

где ε - отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых для функции отклика предел прочности при изгибе равна – 0,313.

Адекватность полученной модели можно оценить, используя коэффициент детерминации R^2 , который для предела прочности при сжатии ГЦПВ составляет – 87,56%. Таким образом, изменение этого показателя на 87,56% обусловлено исследованными факторами и лишь 12,44% приходится на долю остальных факторов. Т.к. полученное значение близко к 1, следовательно, модель хорошо соотносит данные проведенного исследования и объясняет большую долю вариации. В данном случае связь между откликом и факторами можно охарактеризовать как сильную. Коэффициент детерминации для предела прочности при изгибе составляет – 51,64%. Соответственно, 48,36% приходится на долю факторов, объяснить которые уравнение регрессии не может. В этом случае связь между факторами и откликом можно признать средней.

При анализе формулы (1) следует отметить влияние всех исследованных факторов и взаимодействий на функцию отклика – предел прочности при сжатии. Наибольшее по величине и положительное по знаку влияние на функцию отклика оказывают расход пуццолановой добавки и двойное взаимодействие факторов расходов гипса и цемента. Остальные факторы и взаимодействия факторов имеют отрицательный знак. Среди них наибольшие значения коэффициентов имеют расход цемента, взаимодействие расходов гипса и пуццолановой добавки, а также взаимодействие расходов цемента на расход пуццолановой добавки. Величина коэффициента у расхода гипса невелика, что имеет место и у функции отклика – предел прочности при изгибе (см. формулу (2)), за исключением знака. Остальные коэффициенты факторов и взаимодействий факторов для функции отклика – предел прочности при изгибе идентичны по знаку, для функции отклика – предел прочности при сжатии, но различны по

величине. Таким образом, на предел прочности при сжатии наибольшее влияние оказывает расход пуццолановой добавки, а также взаимодействие между расходом гипса и расходом цемента. Уменьшению предела прочности при сжатии способствует расход цемента и взаимодействие между расходами гипса и пуццолановой добавки, а также цемента и пуццолановой добавки.

Экспериментальные данные, полученные в результате проведения исследований, позволили построить контурные графики и графики поверхности для функции отклика – предел прочности при сжатии ГЦПВ (см. рис. 4, 5).

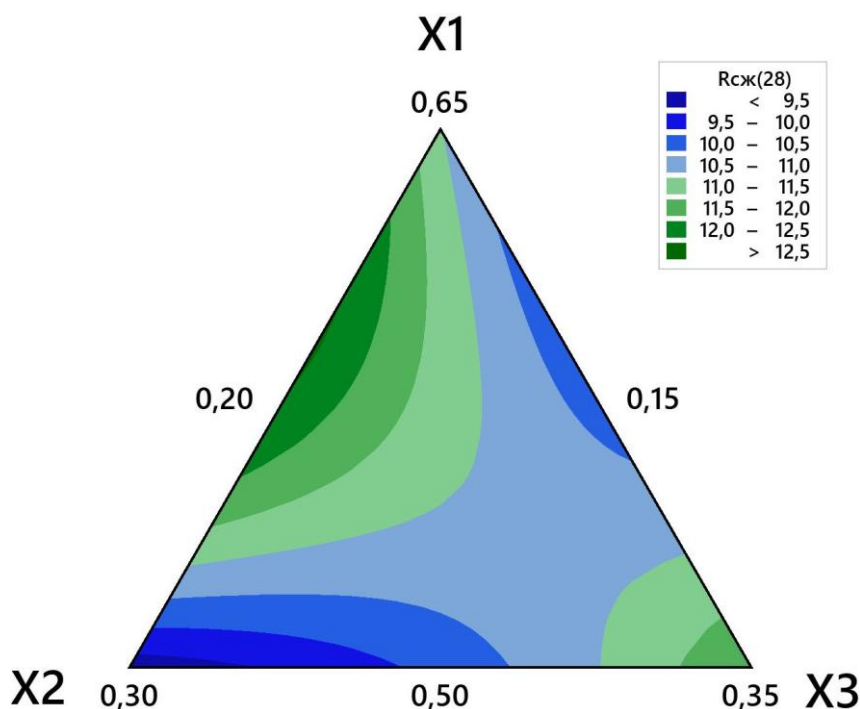


Рис. 4. Контурный график функции отклика $R_{сж(28)}$

Как следует из приведенных на рис. 4 и 5 графиков, максимальный предел прочности при сжатии, на примененных материалах можно получить при расходах составляющих компонентов – 60:20:20. Проведем оптимизацию состава ГЦПВ, используя следующие параметры: получение максимального предела прочности при сжатии при минимальном расходе портландцемента. В данном случае оптимальному составу будут соответствовать следующие

расходы компонентов ГЦПВ: гипса – 58,94%, портландцемента – 21,06% и пуццолановой добавки – 20,00% (см. рис. 6). Такие расходы компонентов обеспечат получение ГЦПВ с пределом прочности при сжатии – 12,56 МПа. Минимальный предел прочности при сжатии получен у состава №5 (см. таблицу №2) и составляет – 9,17 МПа.

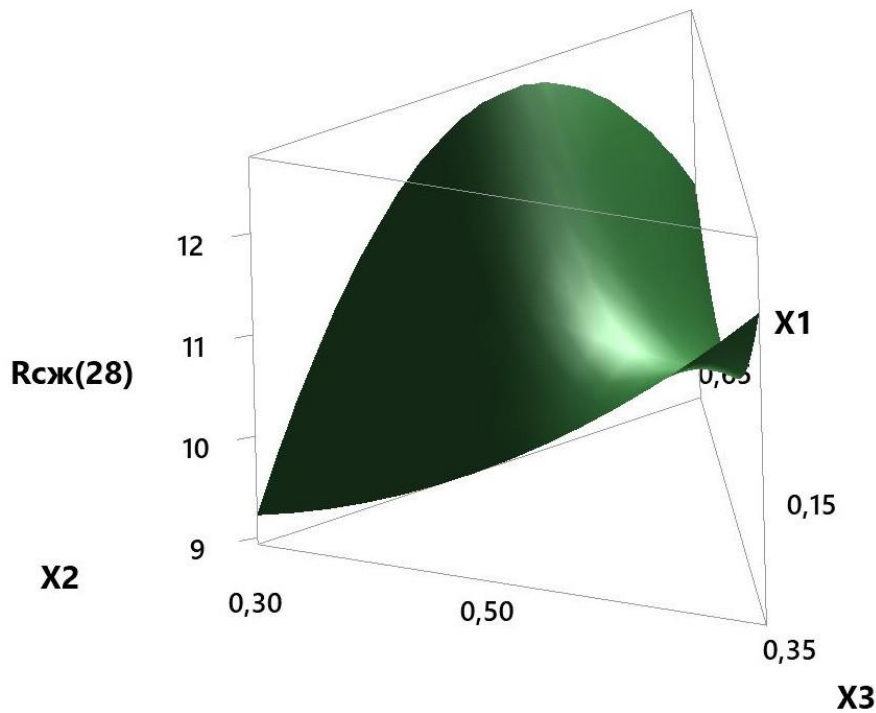


Рис. 5. График поверхности функции отклика $R_{сж(28)}$

Таким образом, обработка и анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы и заключения.

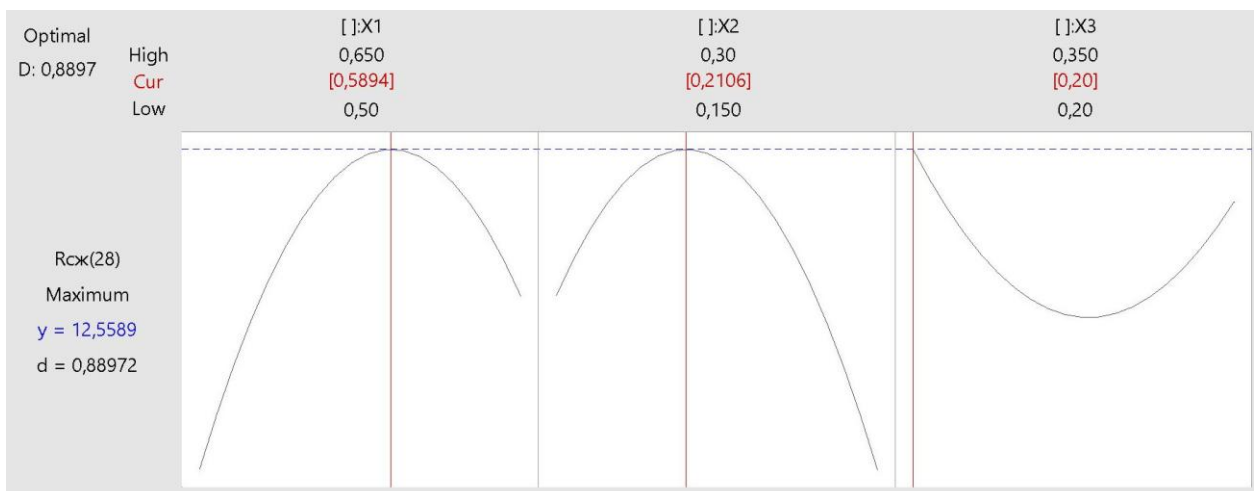


Рис. 6. Оптимизация функции отклика

Примененные в ходе проведения исследований материалы и принятые уровни факторов, и план исследований позволили получить расходы компонентов ГЦПВ для минимального и максимального предела прочности при сжатии. При этом расход гипса изменился с 50,00% до 58,94%, что соответствует его увеличению на 17,88%. Расход портландцемента изменился с 30,00% до 21,06%, т.е. уменьшился на 29,80%. Расход пуццолановой добавки при этом остался неизменным и составляет 20,00%. В результате при заданных параметрах оптимизации предел прочности при сжатии ГЦПВ вырос с 9,17 МПа до 12,56 МПа. Таким образом, используя одни и те же компоненты и применяя методы планирования эксперимента, а также необходимые функции оптимизации можно добиться прироста предела прочности при сжатии ГЦПВ 37%.

Литература

1. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия. Производство и применение. Справочник. М.: АСВ, 2004. 488 с.
2. Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х. Исследование влияния активных минеральных добавок на реологические и физико-механические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Строительные материалы. 2015. №5. С. 20-23.
3. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И. Состояние и тенденции развития промышленности гипсовых строительных материалов // Строительные материалы. 2010. №12. С. 44-46.
4. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Баринов И.М., Бурьянов А.Ф., Лосев Ю.Г., Поплавский В.В., Шишин А.В. Гипс в малоэтажном строительстве. М.: АСВ, 2008. 240 с.
5. Волженский А.В., Роговой М.И., Стамбулко В.И. Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие вещества и изделия. М.: Госстройиздат, 1960. 168 с.

6. Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М.: Стройиздат, 1971. 318 с.
 7. Дмитриева Е.А., Манушина А.С., Потапова Е.Н. Влияние соотношения компонентов в составе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на его свойства // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. №3. С. 28-30.
 8. Соколов П.Э., Молчанов К.О., Крахоткин С.М., Лукиных С.В. Оценка влияния комплексной добавки на водопоглощение фиброгипса // Инженерный вестник Дона, 2023, №4, URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2023/8369
 9. Халиуллин М.И., Нуриев М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р., Князева Н.С. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие с применением молотой термоактивированной глины и пластифицирующих добавок // Известия КГАСУ, 2015, №2 (32). С. 274-280.
 10. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Drebezgova M.Yu., Shatalova S.V. Composite Gypsum Binders with Silica-containing Additives. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327. pp. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032015.
 11. Yakovlev G., Gordina A., Khritankov V., Khozin V., Shaybadullina A., Khazeev D., Bazhenova I., Ivakina A., Saidova Z., Repin A. Gypsum composition with siltstone-based mineral modifier. 13th International Conference. Modern building materials, structures and techniques. Vilnius, Lithuania. VGTU Press. 2019. pp. 217-223.
 12. Gharehbash N., Shakeri A. Modification of the surface of silica nanoparticles; studying its structure and thermal properties in order to strengthen it in preparing Nano composites // Journal of American Science. 2013. № 9(4), pp. 602-606.
-

13. Potapova E., Nyein A.K., Tsvetkova E., Fisher H.-B. Modification of the structure of gypsum-cement-pozzolanic binder. MATEC Web of Conferences 329, 04007. 2020. pp. 1-7. DOI: 10.1051/mateconf/202032904007.

14. Ляшенко Д.А., Соколов П.Э., Перфилов В.А. Вспученный фиброгипсовый материал // Инженерный вестник Дона, 2021, №4, URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924

15. Bumanis G., Vitola L., Pundiene I., Sinka M., Bajare D. Gypsum, Geopolymers, and Starch-Alternative Binders for Bio-Based Building Materials: A Review and Life-Cycle Assessment // Sustainability. 2020. №5666. pp. 1-20. DOI: 10.3390/su1214566.

References

1. Ferronskaya A.V. Gipsovye materialy i izdeliya. Proizvodstvo i primeneniye. Spravochnik [Gypsum materials and products. Production and application. Reference book]. M.: ASV, 2004. 488 p.

2. Izotov V.S., Mukhametrakhimov R.Kh. Stroitel'nye materialy. 2015. №5. pp. 20-23.

3. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I. Stroitel'nye materialy. 2010. №12. pp. 44-46.

4. Ferronskaya A.V., Korovyakov V.F., Barinov I.M., Bur'yanov A.F., Losev Yu.G., Poplavskiy V.V., Shishin A.V. Gips v maloetazhnom stroitel'stve [Gypsum in low-rise construction]. M.: ASV, 2008. 240 p.

5. Volzhenskiy A.V., Rogovoy M.I., Stambulko V.I. Gipsotsementnye i gipsoshlakovye vyazhushchie veshchestva i izdeliya [Gypsum cement and gypsum slag binders and products]. M.: Gosstroyizdat, 1960. 168 p.

6. Volzhenskiy A.V., Stambulko V.I., Ferronskaya A.V. Gipsotsementno-putstsolanovye vyazhushchie, betony i izdeliya [Gypsum-cement-pozzolan binders, concretes and products]. M.: Stroyizdat, 1971. 318 p.

7. Dmitrieva E.A., Manushina A.S., Potapova E.N. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2017. T. 31. №3. pp. 28-30.
8. Sokolov P.E., Molchanov K.O., Krakhotkin S.M., Lukinykh S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №4, URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2023/8369.
9. Khaliullin M.I., Nuriev M.I., Rakhimov R.Z., Gayfullin A.R., Knyazeva N.S. Izvestiya KGASU, 2015, №2 (32). pp. 274-280.
10. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Drebezgova M.Yu., Shatalova S.V. Composite Gypsum Binders with Silica-containing Additives. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327. pp. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032015.
11. Yakovlev G., Gordina A., Khritankov V., Khozin V., Shaybadullina A., Khazeev D., Bazhenova I., Ivakina A., Saidova Z., Repin A. Gypsum composition with siltstone-based mineral modifier. 13th International Conference. Modern building materials, structures and techniques. Vilnius, Lithuania. VGTU Press. 2019. pp. 217-223.
12. Gharehbash N., Shakeri A. Journal of American Science. 2013. № 9(4), pp. 602-606.
13. Potapova E., Nyein A.K., Tsvetkova E., Fisher H.-B. Modification of the structure of gypsum-cement-pozzolanic binder. MATEC Web of Conferences 329, 04007. 2020. pp. 1-7. DOI: 10.1051/mateconf/202032904007.
14. Lyashenko D.A., Sokolov P.E., Perfilov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924.
15. Bumanis G., Vitola L., Pundiene I., Sinka M., Bajare. D. Sustainability. 2020. №5666. pp. 1-20. DOI: 10.3390/su1214566.

Дата поступления: 19.11.2023

Дата публикации: 6.01.2024
