



Подбор компонентного состава гипсоцементнопуццоланового вяжущего, обеспечивающего его наилучшую прочность и водостойкость

Х.А. Кайс¹, Н.Н. Морозова², Р.М. Гильфанов³, В.Г. Хозин², Р.К. Низамов^{2,4}

¹Университет Саны, г. Сана, Республика Йемен

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

³Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Российская Федерация

⁴Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Многокомпонентность гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и бетона на его основе предопределяет полирецептурность, которая диктуется качеством всех компонентов. Рациональным подходом в решении этой проблемы является спланированный эксперимент, позволяющий с минимальными затратами получить достоверный и быстрый результат. Это достигается правильным выбором плана эксперимента. Поэтому цель данной работы заключается в установлении независимых факторов, влияющих на поведение откликов и построение моделей зависимостей. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: установление совокупности компонентов гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, влияющих на поведение наиболее важных характеристик затвердевшей матрицы, а именно, количества цемента, активной минеральной и химической добавок; определение математического плана эксперимента; установление независимых факторов, влияющих на поведение откликов и построение математических моделей зависимостей прочности на сжатие, коэффициента размягчения, водостойкости от состава гипсоцементнопуццоланового вяжущего.

Результаты. В работе представлены результаты исследования физических и физико-механических свойств гипсоцементнопуццоланового камня в зависимости от его компонентного состава. С помощью математических моделей, построенных после математической обработки результатов спланированного эксперимента, была решена задача подбора компонентного состава гипсоцементнопуццоланового вяжущего для которого прочность на сжатие после 28 – ми суток и коэффициент размягчения были бы наибольшими, а водопоглощение не превышало 9 %.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в оптимизации рецептурного гипсоцементнопуццоланового вяжущего и подбора эффективных модифицирующих добавок, что позволит расширить области применения этих материалов и повысить их конкурентоспособность на строительном рынке.

Ключевые слова: гипсоцементнопуццолановое вяжущее, компонентный состав, математическое моделирование, прочность, водостойкость

Для цитирования: Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Гильфанов Р.М., Хозин В.Г., Низамов Р.К. Подбор компонентного состава гипсоцементнопуццоланового вяжущего, обеспечивающего его наилучшую прочность и водостойкость // Известия КГАСУ, 2025, № 3 (73), с. 58-71, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.6, EDN: DUQXVX

Selection of the component composition of a gypsum-cement-pozzolan binder, providing the best strength and water resistance

H.A. Qais¹, N.N. Morozova², R.M. Gilfanov³, V.G. Khozin², R.K. Nizamov^{2,4}

¹Sana'a University, Sana'a, Republic of Yemen

²Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

³Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation

⁴Academy of sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The multicomponent nature of gypsum-cement-pozzolan binder and concrete based on it predetermines the polyrecipe which is dictated by the quality of all components. A rational approach to solving this problem is a planned experiment, which allows obtaining a reliable and fast result with minimal costs. This is achieved by the correct choice of the experimental plan. Therefore, the purpose of this work is to establish independent factors influencing the behavior of responses and creating a dependency model. To achieve this goal, the following tasks were solved: establishing a set of gypsum-cement-pozzolan binder components influencing the behavior of the most important characteristics of the hardened matrix, namely, the amount of cement, active mineral and chemical additives; determining the mathematical plan of the experiment; establishing independent factors influencing the behavior of responses and creating mathematical models of the dependencies of compressive strength, softening coefficient and water resistance on the composition of gypsum-cement-pozzolan binder.

Results. The paper presents the results of a study of the physical and physical-mechanical properties of gypsum-cement-pozzolan binder, depending on its component composition. Using mathematical models constructed after mathematical processing of the results of the planned experiment, the task of selecting the component composition of gypsum-cement-pozzolan binder was solved, for which the compressive strength after 28 days and the softening coefficient would be the highest, and the water absorption would not exceed 9%.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the optimization of the gypsum-cement-pozzolan composition formulation and the selection of effective modifying additives, which will expand the areas of application of these materials and increase their competitiveness in the construction market.

Key words: gypsum-cement-pozzolan binder, component composition, mathematical modeling, strength, water resistance.

For citation: Qais H.A., Morozova N.N., Gilfanov R.M., Khozin V.G., Nizamov R.K. Selection of the component composition of gypsum-cement-pozzolan binder, providing the best strength and water resistance // News of KSUAE, , 2025, № 3 (73), p. 58-71, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.6, EDN: DUQXVX

1. Введение

Гипсовое вяжущее представляет собой перспективный строительный материал, характеризующийся высокой скоростью твердения, технологичностью, экологической безопасностью и огнестойкостью. Вместе с тем его эксплуатационные возможности существенно ограничены вследствие низкой водостойкости и недостаточной прочности, что обуславливает его применение в производстве декоративно-отделочных материалов и изделий, предназначенных для работы в воздушно-сухих условиях [1–3]. Улучшение гидрофизических характеристик гипсового вяжущего, как правило, достигается его рецептурной модификацией. Способ был предложен ещё в середине XX века [4, 5], а внедрение современных модифицирующих добавок [6–8] позволило разработать материал на основе гипса с повышенными физико-механическими свойствами — гипсоцементнопуццолановое вяжущее (ГЦПВ). Введение в состав ГЦПВ современных

суперпластифицирующих добавок (ПД), в частности поликарбоксилатных эфиров, способствует значительному повышению эксплуатационных свойств ГЦПВ за счёт формирования более плотной и однородной микроструктуры ГЦПВ-камня, что сопровождается оптимизацией водотвердого отношения [9–11]. Как показывают результаты исследований [12], модификация ГЦПВ с высоким содержанием низкомарочного гипсового вяжущего (до 76 %) обеспечивает значительное повышение прочности и водостойкости, приближая данные показатели к значениям, характерным для традиционных цементных систем.

В настоящее время модифицированные ГЦПВ находят применение не только в традиционных технологиях изготовления строительных изделий, но и в высокотехнологичных направлениях строительной индустрии, включая аддитивное производство (3D-печать) конструкций различного назначения [13–15]. Комплекс таких характеристик, как высокая технологичность, ускоренное твердение и возможность адаптации реологических свойств под различные способы укладки, обуславливает перспективность применения ГЦПВ в строительстве нового поколения. Это особенно актуально в условиях ограниченных сроков возведения объектов, а также при необходимости изготовления изделий сложной пространственной конфигурации. При этом дальнейшие исследования в области совершенствования гипсового вяжущего и ГЦПВ должны быть направлены на комплексную оптимизацию его рецептурного состава, подбор эффективных модифицирующих добавок и установления влияния на долговечность в реальных условиях эксплуатации, что позволит расширить область применения этих материалов и повысить их конкурентоспособность на строительном рынке.

Многокомпонентность ГЦПВ и бетонов на их основе обуславливает полирецептурный характер их проектирования, при котором отклонения в качестве или количестве отдельных компонентов (вяжущего, заполнителя, минеральных или органических добавок, воды затворения) могут существенно повлиять на макро- и микроструктуру материала. В этой связи наиболее рациональным подходом к разработке и оптимизации рецептур является использование методов математического планирования эксперимента (ПЭ) [16, 17]. Применение ортогональных, центрально-композиционных и ротатабельных планов позволяет с минимальными материальными и временными затратами получить достоверные и оптимизированные зависимости между варьируемыми факторами и откликами, определить синергетические и антагонистические эффекты совместного действия модификаторов, а также спрогнозировать поведение композита в условиях эксплуатации.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является разработка оптимального состава ГЦПВ по прочности и водостойкости с использованием наиболее распространенных сырьевых материалов в Республике Йемен. Для достижения цели решаются следующие задачи: установление совокупности компонентного состава гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, влияющих на поведение наиболее важных характеристик затвердевшей матрицы, а именно, количества цемента, активной минеральной и химической добавок; определение математического плана эксперимента; установление независимых факторов, влияющих на поведение откликов и построение математических моделей зависимостей прочности на сжатие, коэффициента размягчения, водостойкости от состава ГЦПВ.

2. Материалы и методы

Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие, а также два вида пуццолановых минеральных добавок (природный цеолит и микрокремнезем):

- гипсовое вяжущее (ГВ) - марки Г-5 производства ООО «Develop a nation» (Республика Йемен), соответствующего ГОСТ EN 13279-1:2008, физико-механические характеристики которого представлены в табл. 1;

- цементное вяжущее – ЦЕМ I 42,5Н «Amrancement» (Республика Йемен), удовлетворяющий ГОСТ ASTM C 150 – TYPE 1, минеральный состав по паспорту качества представлен в табл. 2, а его физико-механические свойства – табл. 3;

- природный цеолит (ЦЕО), выпускаемый предприятием «Yemenzeolite» в г. Сана Республика Йемен фракции 0-1 мм, который перед применением высушивали до постоянной массы и измельчали до удельной поверхностью $6500 \pm 100 \text{ см}^2/\text{г}$ (метод Козеини – Кармана), а пуццолановая активность по поглощению СаО составила 815 мг/г;

- микрокремнезем (МиК) был получен с Саудовского металлургического комбината «BUILMIX», с размером частиц 0,01-0,1 мкм, его удельная поверхность - $38000 \pm 500 \text{ см}^2/\text{г}$ (метод Козеини – Кармана) и пуццолановая активность - 1210 мг/г.

Химические составы природного цеолита, микрокремнезема и портландцемента представлены в табл. 4.

Таблица 1

Физико-механические свойства гипсового вяжущего

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Тонкость помола, остаток на сите № 02	%	4,5
2	Нормальная густота	%	55
3	Сроки схватывания: - начало / - конец	мин.	6 / 12
4	Предел прочности при изгибе: - через 2 часа - в высушенном до постоянной массы состоянии	МПа	2,9 5,5
5	Предел прочности при сжатии: - через 2 часа - в высушенном до постоянной массы состоянии	МПа	5,35 13,8
6	Коэффициент размягчения	-	0,31

Таблица 2

Минералогический состав портландцемента

Наименование цемента	Минеральный состав клинкера, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
«Amran cement» (ЦЕМ I 42,5Н)	53,8	20,9	6,4	12,04

Таблица 3

Физико-механические свойства портландцемента

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Истинная плотность	г/см ³	3,0
2	Насыпная плотность	г/см ³	1,25
3	Нормальная густота	%	27-28
4	Сроки схватывания цементного теста: - начало / - конец	час-мин	2-55 / 3-40
5	Тонкость помола (проход через сит с сеткой № 008)	%	94
6	Предел прочности в возрасте 28 суток: - при сжатии и - изгибе	МПа	48,5 и 7,0
7	Прочность при сжатии после пропаривания	МПа	38,4
8	Равномерность изменения объема	-	выдерживает

Таблица 4

Химический состав портландцемента и минеральных добавок

Наименование материала	Количество, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ	20,59	63,35	2,94	3,77	-	4,96	-	-	-	1,96
ЦЕО	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	-
МиК	53,8	5,7	2,3	5,2	0,6	26,72	0,7	1,4	-	-

Состав бинарной АМД - 10:5 масс частей. В качестве водоредуцирующей добавки использовали суперпластификатор «Master Glenium 112» производства Master Builders Solutions «MBCC-GROUP» (Германия) [3].

В работе использовали стандартные и общеизвестные методики для определения следующих свойств:

- **подвижность** смеси по диаметру расплыва по ГОСТ 23789-2018 с использованием прибора Суттарда;
- **прочность на сжатие** оценивали после 28 суток твердения в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на образцах-кубиках с размерами ребра 50 мм;
- **водопоглощение** по методике ГОСТ 23789-2018;
- **водостойкость** ГЦПВ - камня оценивали по коэффициенту размягчения, который рассчитывали из отношения предела прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии (водонасыщение в течение 48 часов) к пределу прочности при сжатии образцов в сухом состоянии.

3. Результаты и обсуждение

Из литературных источников [5, 6, 13] известно, что характеристики ГЦПВ как прочность, водопоглощение, водостойкость и другие зависят от его компонентного состава. Поскольку компонентный состав таких вяжущих и бетонов на их основе весьма разнообразен, то до сих пор не определены точные виды этих зависимостей. Наиболее важными характеристиками ГЦПВ являются прочность на сжатие (Y_1), коэффициент размягчения (Y_2) и водопоглощение (Y_3). Определяющими эти свойства являются такие компоненты как портландцемент (ПЦ) - (X_1), активная минеральная добавка (АМД) - (X_2) и суперпластифицирующая добавка (ПД) - (X_3). Поэтому нами были проведены исследования для определения вида таких зависимостей. Вариативность состава ГЦПВ приведена в табл. 5.

Первоначально определено количество воды для составов ГЦПВ из условия получения равноподвижных смесей, которые по расплыву вискозиметра Суттарда имели диаметр 185 ± 5 мм.

Таблица 5

Основные характеристики плана

Характеристика	X_1 (ПЦ)	X_2 (АМД)	X_3 (ПД)
+1	31,5	15	2
0	25	10	1,5
-1	19,5	5	1
Интервал варьирования	5,5	5	0,5

Экспериментальные исследования вначале были проведены по плану полнофакторного эксперимента (ПФЭ) [17]. Выбор этого плана был обусловлен тем обстоятельством, что он является композиционным и ортогональным. Эксперименты для вычисления дисперсии воспроизводимости опытов были проведены в центре плана (опыты в центре плана были продублированы три раза). План реализованных экспериментов с кодированными значениями факторов и их результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6

План полнофакторного эксперимента

№ опыта	Матрица планирования			Отклики		
	X_1	X_2	X_3	Y_1 (R)	Y_2 (Kp)	Y_3 (W)
1	1	1	1	44,58	0,89	7,91
2	1	1	-1	42,12	0,85	8,27
3	1	-1	1	43,31	0,86	8,05
4	1	-1	-1	40,44	0,84	9,24
5	-1	1	1	35,82	0,77	12,69
6	-1	1	-1	32,25	0,72	14,93
7	-1	-1	1	33,70	0,70	15,66
8	-1	-1	-1	33,70	0,69	17,42
9	0	0	0	43,27	0,87	8,31
10	0	0	0	42,59	0,86	8,40
11	0	0	0	41,80	0,85	8,54
где «1» – максимальное значение, «0» – среднее значение, «-1» – минимальное значение соответствующего фактора						

Результаты экспериментов, приведенных в табл. 6, были обработаны методом наименьших квадратов с тем, чтобы построить модели вида:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{23} \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (1)$$

После выполнения соответствующих расчетов и исключения из моделей незначимых членов они приобрели следующий окончательный вид:

$$Y_1 = 39,18 + 4,69 \cdot X_1 \quad (2)$$

$$F_{рас} = 6,02;$$

$$Y_2 = 0,81 + 0,07 \cdot X_1 \quad (3)$$

$$F_{рас} = 2,96;$$

$$Y_3 = 10,86 - 3,40 \cdot X_1 \quad (4)$$

$$F_{рас} = 2,83.$$

Проверкой моделей (2)-(4) на адекватность по критерию Фишера [17] было установлено, что все они являются не адекватными, так как расчетные значения критерия для них больше критических:

$$\text{для модели (2) } F_{рас} = 6,02 > F_{кр}(0,05; 9; 16) = 2,6;$$

$$\text{для модели (3) } F_{рас} = 2,96 > F_{кр}(0,05; 9; 16) = 2,6;$$

$$\text{для модели (4) } F_{рас} = 2,83 > F_{кр}(0,05; 9; 16) = 2,6.$$

В связи с этим возникла необходимость поиска зависимости между откликами Y_1 , Y_2 , Y_3 и факторами X_1 , X_2 , X_3 в виде моделей второго порядка.

Для построения моделей второго порядка нужен иной план экспериментов. Этот план был составлен путем добавления дополнительных шести опытов к плану экспериментов, приведенному в табл. 6. Дополнительные опыты были проведены в центрах граней куба (в звездных точках). Вновь построенный план является почти D оптимальным, а так же обладает теми же свойствами (ортогональности и композиционности), что и первоначальный.

План экспериментов полученный, после добавления в план, приведенный в табл. 6, дополнительных экспериментов в звездных точках и их результаты показаны в табл. 7 и табл. 8.

Таблица 7

Модифицированный план экспериментов в кодированных

№ опыта	Матрица планирования		
	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	1	1	-1
3	1	-1	1
4	1	-1	-1
5	-1	1	1
6	-1	1	-1
7	-1	-1	1
8	-1	-1	-1
9	1	0	0
10	-1	0	0
11	0	1	0
12	0	-1	0
13	0	0	1
14	0	0	-1
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

Обработка результатов экспериментов, реализованных по плану, приведенному в табл. 7, позволяет строить модели второго порядка вида:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_{11} \cdot X_1^2 + a_{22} \cdot X_2^2 + a_{33} \cdot X_3^2 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (5)$$

После обработки результатов спланированного эксперимента, проведенного по плану из табл. 7, с помощью специальной программы, написанной на алгоритмическом языке VBA, были получены следующие модели (модели (6) - (8) приведены после исключения из них незначимых членов):

$$Y_1 = 42,42 + 4,71 \cdot X_1 + 0,93 \cdot X_2 + 1,46 \cdot X_3 - 3,27 \cdot X_1^2 - 1,21 \cdot X_3^2. \quad (6)$$

$$F_{рас} = 0,30.$$

$$Y_2 = 0,85 + 0,07 \cdot X_1 + 0,02 \cdot X_2 + 0,02 \cdot X_3 - 0,05 \cdot X_1^2 - 0,02 \cdot X_3^2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (7)$$

$$F_{рас} = 0,99.$$

$$Y_3 = 8,66 - 3,37 \cdot X_1 - 0,77 \cdot X_2 - 0,71 \cdot X_3 + 2,50 \cdot X_1^2 + 0,64 \cdot X_3^2 + 0,54 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,31 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (8)$$

$$F_{рас} = 3,37.$$

Проверка моделей (6) - (8) на адекватность по критерию Фишера показала, что все они являются адекватными так как для них выполняются неравенства:

- для модели (6) $F_{рас} = 0,30 < F_{кр}(0,05;9,2) = 19,4$;
- для модели (7) $F_{рас} = 0,99 < F_{кр}(0,05;7,2) = 19,3$;
- для модели (8) $F_{рас} = 3,37 < F_{кр}(0,05;7,2) = 19,3$.

Таблица 8

Матрица планирования и результаты испытаний в натуральных переменных

№ опыта	Матрица планирования			Отклики (результаты испытаний)		
	X1	X2	X3	У1	У2	У3
	ПЦ, %	АМД, %	ПД, %	прочность на сжатие, МПа	коэффициент размягчения	водопоглощение, %
1	31,5	15	2	44,58	0,89	7,91
2	31,5	15	1	42,12	0,85	8,27
3	31,5	5	2	43,31	0,86	8,05
4	31,5	-1	1	40,44	0,84	9,24
5	19,5	15	2	35,82	0,77	12,69
6	19,5	15	1	32,25	0,72	14,93
7	19,5	5	2	33,70	0,70	15,66
8	19,5	5	1	33,70	0,69	17,42
9	31,5	10	1,5	44,00	0,87	8,00
10	19,5	10	1,5	34,48	0,73	14,50
11	25	15	1,5	43,71	0,84	8,36
12	25	5	1,5	40,57	0,83	9,49
13	25	10	2	42,88	0,86	8,62
14	25	10	1	39,72	0,80	10,17
15	25	10	1,5	43,27	0,87	8,31
16	25	10	1,5	42,59	0,86	8,40
17	25	10	1,5	41,80	0,85	8,54

Построенные модели (6) - (8) в дальнейшем могут использоваться для прогнозирования значений откликов Y_1 , Y_2 , Y_3 при тех значениях факторов X_1 , X_2 , X_3 , которые отсутствуют в плане экспериментов, приведенном в табл. 7; а также для решения задач оптимизации по подбору компонентного состава ГПЦВ, обеспечивающего его оптимальные гидрофизические характеристики. На рис. 1-3 приведены поверхности откликов Y_1 , Y_2 , Y_3 построенные по моделям (6) – (8) при фиксированных значениях фактора X_2 (бинарной АМД).

С помощью математических моделей (6) – (8) была решена задача подбора компонентного состава ГПЦВ, для которого прочность на сжатие после 28–ми суток и коэффициент размягчения были бы наибольшими, а водопоглощение не превышало 9 %.

Математическая формулировка этой задачи имеет вид:

$$\text{Найти: } \max Y_1 \text{ и } \max Y_2 \quad (9)$$

$$\text{при } Y_3 < 9; \quad (10)$$

$$-1 \leq X_1, X_2, X_3 \leq 1. \quad (11)$$

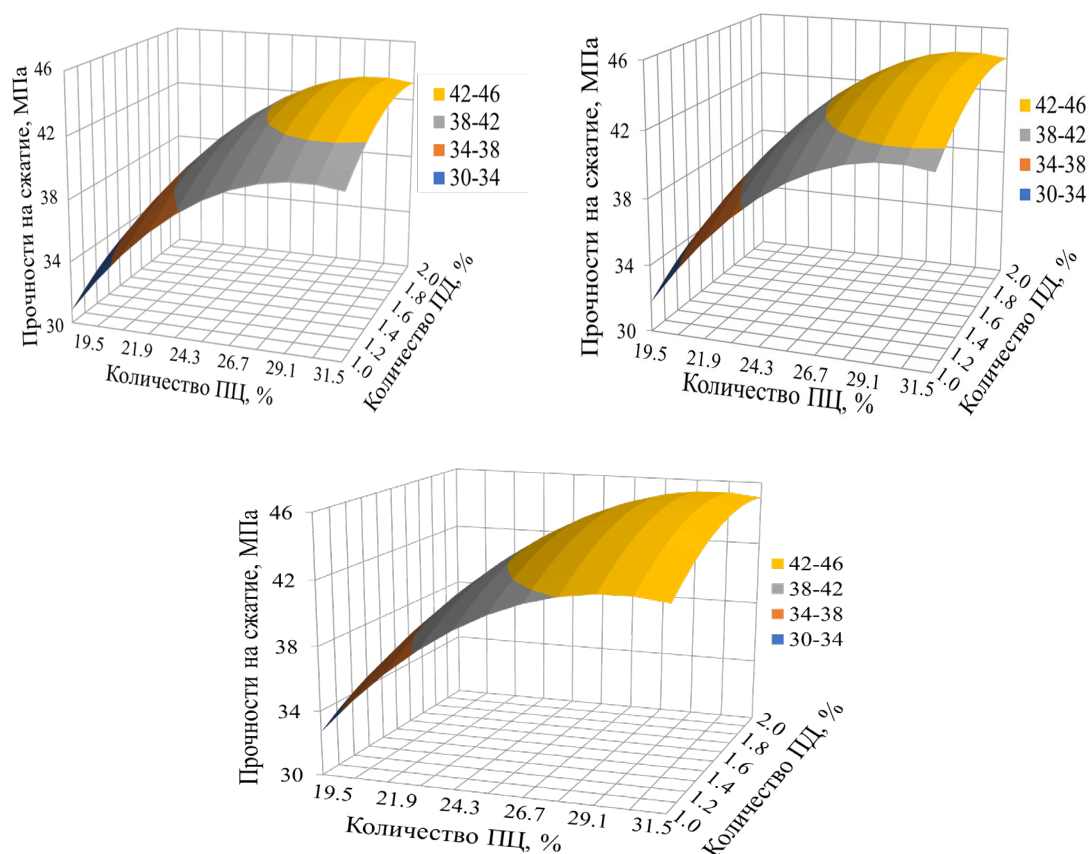


Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие ГЦПВ-камня от количества цемента и ПД при содержании АМД в количестве 5-15% (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Dependence of compressive strength of GCPB stone on the amount of cement and PD with an AMD content of 5-15% (illustration by the authors)

Задача (9) – (11) является многокритериальной. Она была решена методом построения приближенного множества Парето, суть которого заключается в сведении ее к однокритериальной путем включения обоих критериев оптимизации в обобщенный критерий. Для этого предварительно были решены две задачи однокритериальной оптимизации:

$$\text{Найти: } \max Y_1 \quad (12)$$

$$\text{при } Y_3 < 9; \quad (13)$$

$$Y_2 > 0,8; \quad (14)$$

$$-1 \leq X_1, X_2, X_3 \leq 1. \quad (15)$$

и

$$\text{найти: } \max Y_2 \quad (16)$$

$$\text{при } Y_3 < 9; \quad (17)$$

$$Y_1 > 40; \quad (18)$$

$$-1 \leq X_1, X_2, X_3 \leq 1. \quad (19)$$

После решения задач (12) – (15) и (16) – (19) были соответственно получены результаты: $X_1 = 0,7202$; $X_2 = 1$; $X_3 = 0,6033$; $Y_1 = 45,4865$; $Y_2 = 0,9108$ и $X_1 = 0,8718$; $X_2 = 1$; $X_3 = 0,7179$; $Y_1 = 45,3954$; $Y_2 = 0,9121$.

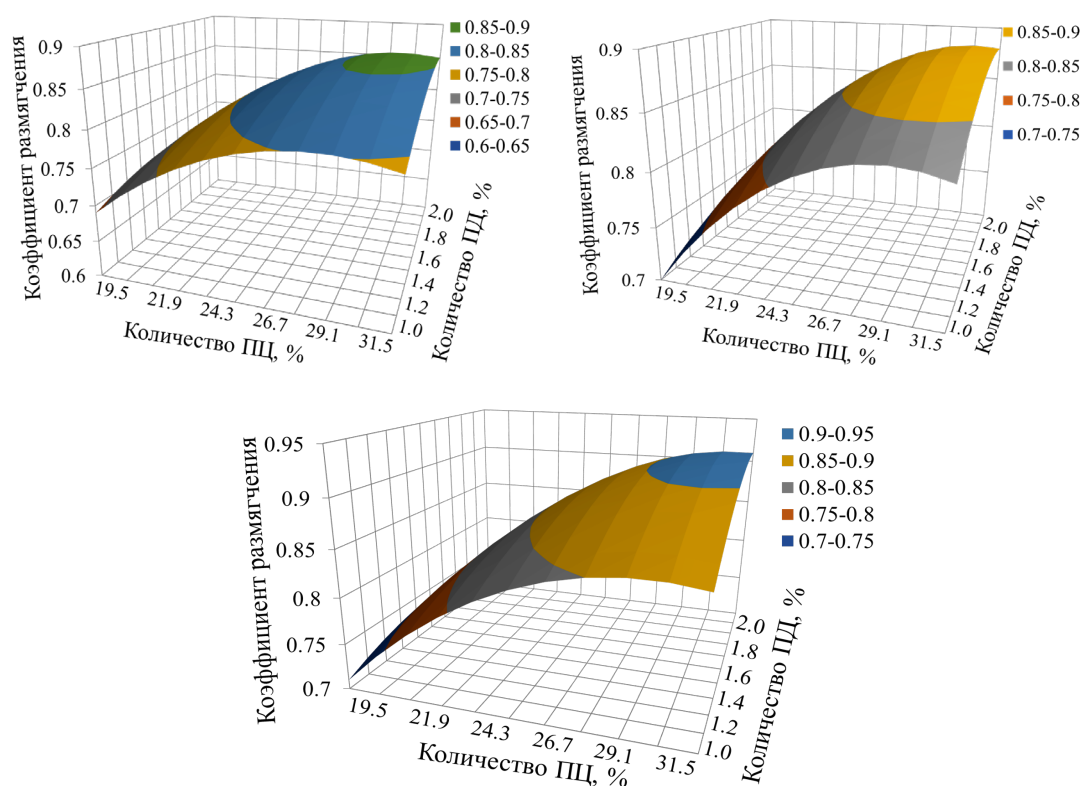


Рис. 2. Зависимость коэффициента размягчения ГЦПВ-камня от количества цемента и ПД при содержании АМД в количестве 5-15% (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Dependence softening coefficient of GCPB stone on the amount of cement and PD with an AMD content of 5-15% (illustration by the authors)

Эти результаты были использованы при конструировании обобщенного критерия для сведения задачи (9) – (11) к задаче однокритериальной оптимизации. После построения обобщенного критерия задача (9) – (11) приобрела вид:

$$\text{Найти: } \max \left\{ k \cdot \frac{Y_1 + 45,4865}{45,4865} + (1 - k) \cdot \frac{Y_2 + 0,9121}{0,9121} \right\}; \quad (20)$$

$$\text{при } Y_3 < 9; \quad (21)$$

$$-1 \leq X_1, X_2, X_3 \leq 1. \quad (22)$$

здесь k - параметр, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1.

Задача (20) – (22) решалась одиннадцать раз при изменении значения параметра k от 0 до 1 с шагом 0,1. При этом были получены некоторые точки множества Парето для задачи (9) – (11). Результаты решения приведены в табл. 9.

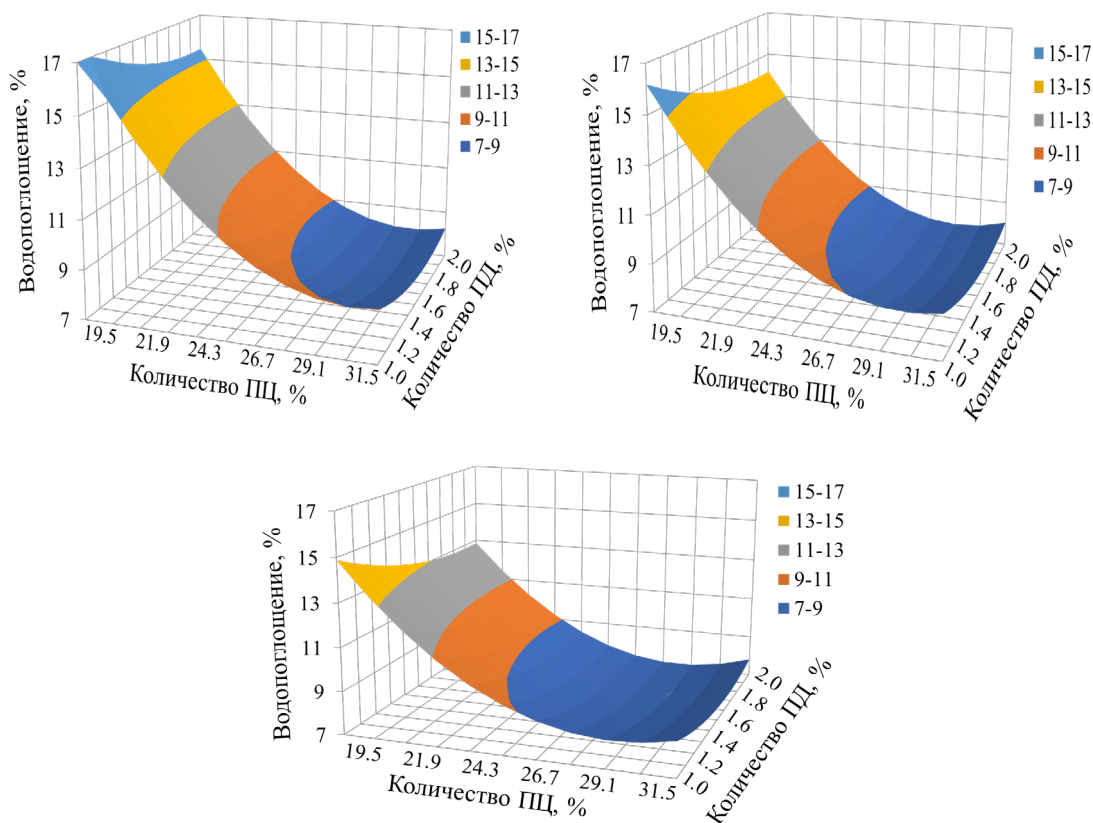


Рис. 3. Зависимость водопоглощения ГЦПВ-камня от количества цемента и ПД при содержании АМД в количестве 5-15% (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence water absorption of GCPB stone on the amount of cement and PD with an AMD content of 5-15% (illustration by the authors)

Таблица 9

Результаты решения задачи (20) – (22) при соответствующих значениях параметра k

k	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Q
0,0000	0,8718	1,0000	0,7179	45,3954	0,9121	7,3371	2,0000
0,1000	0,8509	1,0000	0,6997	45,4192	0,9120	7,2932	1,9998
0,2000	0,8318	1,0000	0,6836	45,4379	0,9120	7,2557	1,9997
0,3000	0,8141	1,0000	0,6692	45,4523	0,9119	7,2234	1,9996
0,4000	0,7978	1,0000	0,6565	45,4633	0,9117	7,1955	1,9996
0,5000	0,7826	1,0000	0,6450	45,4716	0,9116	7,1500	1,9996
0,6000	0,7685	1,0000	0,6348	45,4776	0,9115	7,1502	1,9996
0,7000	0,7553	1,0000	0,6256	45,4812	0,9113	7,1314	1,9997
0,8000	0,7428	1,0000	0,6174	45,4845	0,9111	7,1151	1,9998
0,9000	0,7312	1,0000	0,6100	45,4860	0,9110	7,1006	1,9999
1,0000	0,7202	1,0000	0,6033	45,4865	0,9108	7,0878	2,0000

Построив по значениям, взятым из табл. 9, график зависимости X_1 от X_3 , при фиксированном значении $X_2 = 1,000$ мы получаем приближенное множество Парето для задачи (9) – (11).

Все компонентные составы ГЦПВ, приведенные в табл. 9 являются несравнимыми альтернативами, входящими во множество Парето задачи (9) – (11). Построение множества Парето позволяет сузить область, в которой лицу принимающему решение нужно выбрать решение задачи (9) – (11). Анализ множества Парето (рис. 4) привело к заключению, что оптимальным компонентным составом, обеспечивающим максимальные значения $Y_1 = 45,4716$ (прочность на сжатие) и $Y_2 = 0,9116$ (коэффициент размягчения) является следующий: $X_1 = 0,7826$; $X_2 = 1$; $X_3 = 0,645$ в кодированных переменных.

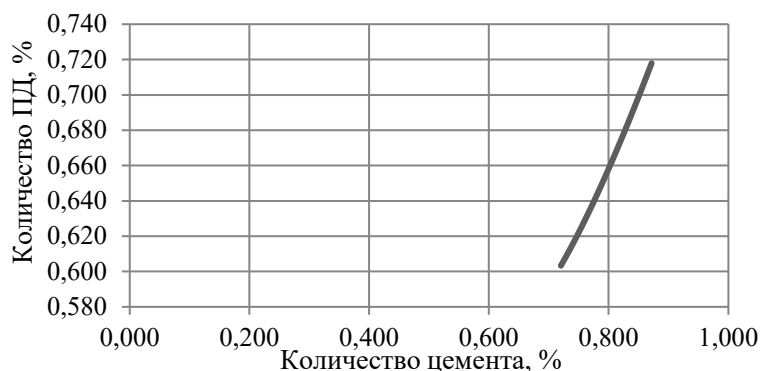
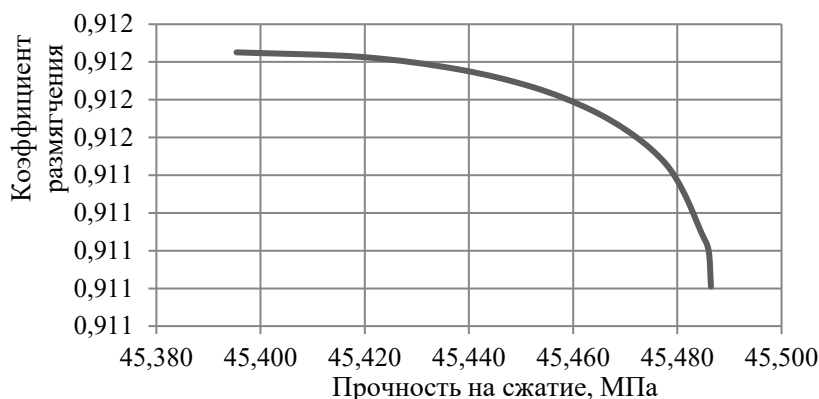
Рис. 4. Приближенное множество Парето задачи (9) – (11) при $X_2 = 15\%$ (иллюстрация авторов)Fig. 4. Approximate Pareto set of the problem (9) – (11) for $X_2 = 15\%$ (illustration by the authors)

Рис. 5. Образ приближенного множества Парето задачи (9) – (11) (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Image of the approximate Pareto set of the problem (9) – (11) (illustration by the authors)

Выбранный математический план эксперимента позволил построить адекватные модели, описывающие поверхности откликов наиболее важных характеристик ГЦПВ и с помощью них сформулировать и решить задачу оптимизации по подбору компонентного состава ГЦПВ, обеспечивающего наилучшие показатели его важнейших характеристик: прочности на сжатие и коэффициента размягчения. Известны работы [18, 19], в которых авторы предпринимают попытку оптимизировать состав химического модификатора для ГЦПВ, но решают ее не с помощью математического аппарата, а путем визуального анализа поверхностей зависимостей химического модификатора от компонентного его состава. .

4. Заключение

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Выбранный математический план эксперимента позволил построить адекватные модели, описывающие зависимости прочности на сжатие, коэффициента размягчения и водопоглощения от компонентного состава ГЦПВ. С помощью построенных моделей сформулирована и решена задача оптимизации по подбору состава ГЦПВ, обеспечивающего наилучшие показатели его важнейших характеристик.

2. Особое влияние на прочность при сжатии ГЦПВ камня оказывает бинарная АМД, ее увеличение до 10% расширяет область поверхности с высокой прочностью при снижении расхода цемента и суперпластификатора, наибольшее снижение доли ПЦ до 25% и ПД до 1% достигается при содержании в составе ГЦПВ 15% бинарной АМД.

3. Существенное влияние на водопоглощение оказывает количество портландцемента в составе ГЦПВ. Наименьшие показатели водопоглощения ГЦПВ камня получены на составах с содержанием портландцемента не менее 25%.

4. Высокий коэффициент размягчения (0,90 - 0,95) получен на ГЦПВ с 15% бинарной АМД, не менее 25% портландцемента и не менее 1,5% добавки «MasterGlenium 112».

Таким образом, интеграция методов ПЭ в процесс разработки состава ГЦПВ позволяет не только системно подбирать оптимальное соотношение компонентов, но и обеспечить заданный комплекс свойств — от высокой прочности и водостойкости до технологичности в укладке и совместимости с современными методами строительства, включая технологии аддитивного производства.

Список литературы/ References

1. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Баранов И.М., Бурьянов А.Ф., Лосев Ю.Г., Попплавский В.В., Шишин А.В. Гипс в малоэтажном строительстве. – М.: Изд-во АСВ. 2008. –240 с.
Ferronskaya A.V., Korovyakov V.F., Baranov I.M., Buryanov A.F., Losev Yu.G., Poplavsky V.V., Shishin A.V. Gypsum in low-rise construction. – М.: ABC Publishing house, 2008. 240 p.
2. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б. Применение гипсовых композитов в качестве внутренних отделочных материалов уникальных зданий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 4. С. 7-15.
Petropravlovskaya V.B., Zavadko M.Yu., Novichenkova T.B. Application of Gypsum Composites as Interior Finishing Materials for Unique Buildings // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Structures. Technologies. 2018. No. 4. P. 7-15.
3. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Влияние пластифицирующих добавок различного состава на свойства комплексного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8–24. С. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70.
Qais H.A, Morozova N.N. Influence of plastifying additives of different origin on the properties of complex gypsum-cement-pozzolanic binder. // News of Higher Education Institutions.Construction.2024. No. 8–24. P. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70.
4. Антипин А.А. Гипсовые строительные детали для скоростного строительства // Опыт стройки. 1939. № 4. С. 43.
Antipin A.A. Gypsum building parts for high-speed construction // Construction experience. 1939. No. 4. P. 43.
5. Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М.: Стройиздат, 1971. 318 с.
Volzhensky A.V., Stambulko V.I., Ferronskaya A.V. Gypsum-cement-pozzolanic binders, concretes and products. Moscow: Stroyizdat, 1971. 318 p.
6. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Власов В.В. Высокопрочное гипсоцементноцеолитовое вяжущее // Строительные материалы. 2010. № 2. С. 53-55.
Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G., Vlasov V.V. High-Strength Gypsum-Cement-Zeolite Binder // Construction materials. 2010. No. 2. P. 53-55.
7. Галаутдинов А.Р. Механохимически активированное композиционное гипсовое вяжущее// Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2020. № 1 (12). С. 29-34.
Galautdinov A.R. Mechano-chemically activated composite gypsum binder// Resource-and Energy-Efficient Technologies in the Construction Complex of the Region. 2020. No. 1 (12). P. 29-34
8. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Тарасова А.А.. Полифункциональный химический модификатор гипсоцементных композиций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 11(74). С. 17-25. DOI: 10.18720/CUBS.74.3
Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Tarasova A.A.. Polyfunctional chemical modifier of gypsum-cement compositions // Construction of unique buildings and structures. 2018. No. 11(74). P. 17-25. DOI: 10.18720/CUBS.74.3

9. Кайс Х.А., Богданов Р.Р., Морозова Н.Н., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №8. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28.
Qais H.A., Bogdanov R.R., Morozova N.N., Mavlyuberdinov A.R., Suleymanova L.A. Influence of superplastifying additives based on polycarboxylate ether on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. P. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28.
10. Mukhametrakhimov R.Kh. Investigation of plasticizing additives based on polycarboxylate esters on the properties of concretes formed by 3D printing // Construction Materials and Products. 2022. Vol. 5 (5). P. 42 – 58. DOI:10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58
11. Potapova E., Nyein A.K., Tsvetkova E., & Fischer H.-B. Influence of Additives on the Structure and Properties of Gypsum-Cement-Pozzolan Binder // Research Developments in Science and Technology. 2022. Vol. 5. P. 1–9. DOI:10.9734/bpi/rdst/v5/15957D
12. Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х. Особенности гидратации модифицированного гипсоцементно - пуццоланового вяжущего // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 58-63.
Galautdinov A.R., Mukhametrakhimov R.Kh. features of hydration of modified gypsum-cement- pozzolan binder // Construction materials. 2019. No. 10. P. 58-63.
13. Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Гипсоцементно-пуццолановые бетоны для аддитивного строительного производства //Вестник МГСУ. 2024. Т. 19.№4. С. 580-595. DOI:10.22227/1997-0935.2024.4.580-595
Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Gypsum-cement-pozzolan concrete for additive construction production // Bulletin of MGSU. 2024. Vol. 19. No. 4. P. 580-595. DOI:10.22227/1997-0935.2024.4.580-595
14. Sahmenko, G.; Puzule, L.; Sapata, A.; Slosbergs, P.; Bumanis, G.; Sinka, M.; Bajare, D. Gypsum–Cement–Pozzolan Composites for 3D Printing: Properties and Life Cycle Assessment // Journal of Composites Science. 2024, 8, 212. DOI:10.3390/jcs8060212.
15. Морозова Н.Н., Закиров К.И. Сравнительная эффективность замедлителей схватывания гипсоцементнопуццоланового бетона для 3D –печати // Решения современных проблем материаловедения и технологий в строительстве. ВладСтройТех 2024: Материалы I Международной конференции молодых ученых / Под общ. ред. Ю.Т. Панова и С.В. Ананьева. – М: ИП Лысенко А.Д. «Press-Book.ru», 2024. С.131-134.
Morozova N.N., Zakirov K.I. Comparative efficiency of gypsum-cement-pozzolan concrete setting retarders for 3D printing // Solutions to modern problems of materials science and technology in construction. VladStroyTech 2024: Proceedings of the 1st International Conference of Young Scientists / Under the general editorship of Yu.T. Panov and S.V. Ananyev. - M: IP Lysenko A.D. "Press-Book.ru", 2024. P.131-134.
16. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. Wiley, 2017. 629 p.
17. Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М. Математическое моделирование и оптимизация "состав-свойство" многокомпонентных смесей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (20). С. 289-297.
Akhmadiev F.G., Gilfanov R.M. Mathematical modeling and "composition-property" optimization of multicomponent mixtures // News of Kazan State University of Architecture and Engineering. 2012. No. 2 (20). P. 289-297.
18. Ахметжанов А.М., Урбанов А.В., Потапова Е.Н. Применение методов планирования эксперимента при изучении комплексного влияния добавок на свойства вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7 (176). С. 14-16.

Akhmetzhanov A.M., Urbanov A.V., Potapova E.N. Application of experimental design methods in studying the complex effect of additives on the properties of a binder // Advances in chemistry and chemical technology. 2016. Vol. 30. No. 7 (176). P. 14-16.

19. Соколов П.Э., Бажуков Д.М., Солев Д.И., Карапузов В.И. Оптимизация состава гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Инженерный вестник Дона, 2024, №1, С. 290-304. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_2__1y24

Sokolov P.E., Bazhukov D.M., Solev D.I., Karapuzov V.I. Optimization of the composition of gypsum-cement-pozzolan binder // Engineering Bulletin of the Don, 2024, No. 1, P. 290-304. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_2__1y24.

Информация об авторах

Кайс Хамза Абдулмалек, Исследователь, Университет Саны, г. Сана, Республика Йемен
Email: hamza.qais@mail.ru, ORCID: 0009-0000-2805-7760

Морозова Нина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: ninamor@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7867-4203

Гильфанов Рашит Махмутович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: gilfanov.rash@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9837-5083

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Низамов Рашит Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Академик Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: Nizamov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3448-7369

Information about the authors

Hamza A. Qais, Postgraduate researcher, Sana'a University, Sana'a, Republic of Yemen

Email: hamza.qais@mail.ru, ORCID: 0009-0000-2805-7760

Nina N. Morozova, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: ninamor@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7867-4203

Rashit M. Gilfanov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation

Email: gilfanov.rash@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9837-5083

Vadim G. Khozin, doctor of Technical Sciences, professor, head of Department, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: Nizamov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3448-7369

Дата поступления: 23.08.2025

Дата принятия: 18.10.2025