

УДК 691.311

Т. К. Акчурин, П. Э. Соколов, В. Г. Поляков, О. В. Душко, В. В. Лупиногин

Волгоградский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА СОСТАВА И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ФИБРОГИПСА

В статье приведены результаты исследований разработки фиброгипса с использованием гипсового вяжущего и комплексной модифицирующей добавки. Основным условием получения фиброгипса являлось уменьшение расхода вяжущего вещества за счет использования тонкомолотого инертного минерального порошка при сохранении прочностных показателей исходного гипсового вяжущего. Предварительный анализ результатов проведенных исследований позволил получить их описательные статистики, с помощью которых установлено влияние и степень влияния факторов на исследованные отклики. Обработка результатов исследований позволила получить зависимости основных физико-механических свойств фиброгипса от исследованных факторов. Проведена оптимизация состава комплексной добавки для получения максимальной прочности фиброгипса. Полученные результаты исследований позволяют получать фиброгипс с заданными физико-механическими свойствами при условии уменьшения расхода гипсового вяжущего.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гипсовое вяжущее, комплексная добавка, фиброгипс, свойства, планирование эксперимента, уравнения регрессии.

Вяжущие вещества и материалы на основе гипса с полной уверенностью можно отнести к одним из первых строительных материалов, которые нашли применение в строительстве еще до нашей эры. Они применяются и в настоящее время и с высокой долей вероятности будут применяться в строительстве в обозримом будущем [1].

Широкому распространению строительных материалов на основе гипсовых вяжущих способствует наличие у них целого ряда положительных свойств: низкие энергозатраты для производства, простота использования, высокая скорость твердения и набора прочности, экологичность и т. д. [2].

Тем не менее наряду с положительными свойствами гипсовые вяжущие и материалы на их основе имеют и отрицательные, поэтому в работах как российских, так и зарубежных авторов [3] повышенное внимание уделяется в первую очередь рациональному и экономному использованию гипсового вяжущего [4, 5]. Во-вторых, с целью регулирования свойств гипсовых вяжущих [6, 7] и физико-механических свойств материалов на их основе проводятся исследования по использованию химических добавок [8], минеральных наполнителей [9] и различного вида фибр [10—12].

Использование комплексных добавок позволяет направленно регулировать свойства гипсовых вяжущих в процессе изготовления и эксплуатации материалов на основе гипса [13, 14]. Наряду с увеличением количества компонентов комплексной добавки возникает необходимость в уменьшении количества проводимых экспериментов и повышении их эффективности. Для решения этих задач широко используются методы планирования эксперимента [15].

Современные исследования и разработки материалов на основе гипса направлены на снижение себестоимости и повышение эффективности компо-

зиционных гипсовых материалов [16], поэтому исследования, направленные на снижение расхода гипсового вяжущего без существенной потери физико-механических свойств фиброгипса, являются актуальными на сегодняшний день.

Цель работы — исследование влияния комплексной добавки на основные физико-механические свойства фиброгипса и выявление возможности снижения расхода гипсового вяжущего без ухудшения прочностных свойств фиброгипса.

Для проведения исследований в качестве вяжущего вещества применялся строительный гипс марки Г-4 Б-II, обладающий на момент проведения исследований следующими свойствами: предел прочности при сжатии — 3,96 МПа, предел прочности при изгибе — 2,15 МПа, средняя плотность гипсового камня — 1,055 г/см³. Комплексная модифицирующая добавка состояла из следующих компонентов: суперпластификатор Aktiflux 020, редеспергируемый полимерный порошок RPP 100, полимерная фибра — отход от производства геосеток и другой продукции, тонкодисперсный инертный минеральный наполнитель МП-1 и пеногаситель SiOtan 10. Пеногаситель применялся для удаления лишнего воздуха из смеси и получения более плотного фиброгипса. Пеногаситель вводился во все составы, за исключением контрольного, и не являлся фактором при планировании эксперимента.

Определение прочностных показателей проводилось в соответствии с действующими нормативными документами, на образцах-балочках размерами 40 × 40 × 160 мм. Для определения предела прочности при сжатии использовался пресс ПИ-100-1-1-4, а для предела прочности при изгибе — машина РМУ-0,05-1.

Для проведения исследований выбран центральный композиционный план, который для четырех факторов включал в себя 16 точек куба, 7 центральных точек и 8 осевых. Условия планирования эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия варьирования независимых переменных

Фактор	Наименование фактора	Уровни варьирования, %		
		-1	0	+1
X1	Полимерная фибра	0,375	0,450	0,525
X2	Минеральный порошок	23,75	32,50	41,25
X3	Суперпластификатор	1,625	2,750	3,875
X4	Редеспергируемый полимерный порошок	0,875	1,250	1,625

В качестве функций отклика приняты полученные в результате проведения эксперимента характеристики: Y1 — предел прочности при сжатии, МПа; Y2 — предел прочности при изгибе, МПа; Y3 — средняя плотность фиброгипса, кг/л.

Ввиду значительного объема проведенных исследований в табл. 2 приведен фрагмент плана и полученных результатов исследований.

Таблица 2

План эксперимента и результаты исследований (фрагмент)

№ п/п	Факторы				Отклики		
	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3
1	0,375	23,75	1,625	0,875	1,60	1,93	1,008
2	0,525	23,75	1,625	0,875	2,95	2,31	0,972
3	0,375	41,25	1,625	0,875	4,38	3,37	0,944
4	0,525	41,25	1,625	0,875	1,08	1,66	0,973
5	0,375	23,75	3,875	0,875	2,11	1,95	1,190
6	0,525	23,75	3,875	0,875	2,01	1,95	1,000
7	0,375	41,25	3,875	0,875	2,56	2,33	0,953
8	0,525	41,25	3,875	0,875	2,98	2,67	0,947
9	0,375	23,75	1,625	1,625	2,06	2,23	1,090
10	0,525	23,75	1,625	1,625	2,60	2,29	1,020

Предварительный анализ полученных результатов исследований представлен в виде коробчатых диаграмм на рис. 1.

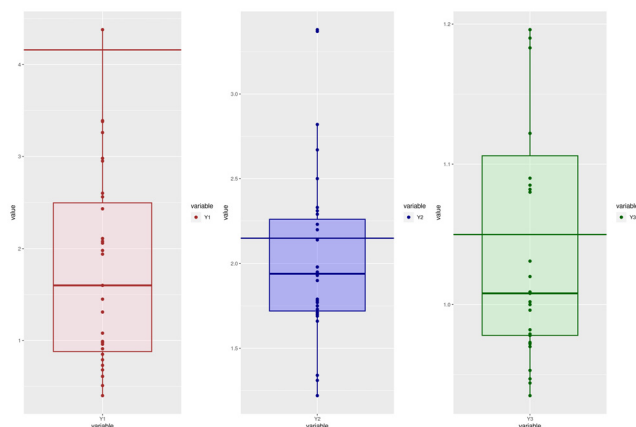


Рис. 1. Коробчатые диаграммы для полученных результатов исследований

В таблице 3 приведены числовые значения описательных характеристик полученных результатов.

Таблица 3

Описательные статистики результатов исследований

Наименование	Отклики		
	Y1	Y2	Y3
Минимум	0,400	1,220	0,935
Нижний квартиль	0,820	1,720	0,978
Медиана	1,600	1,940	1,008
Среднее	1,758	2,033	1,043
Верхний квартиль	2,495	2,260	1,106
Максимум	4,380	3,380	1,196

Диаграммы, приведенные на рис. 1, иллюстрируют распределение значений непрерывных переменных и отражают пять статистических параметров: минимум, нижний квартиль (25-й процентиль), медиану (50-й процентиль), верхний квартиль (75-й процентиль) и максимум. Помимо этого на диаграммах отображены вероятные выбросы в виде отдельно отстоящих точек (диаграмма для функции отклика Y_2), значения которых выходят за диапазон $\pm 1,5$ межквартильного размаха, разности верхнего и нижнего квартилей. Сплошная горизонтальная линия на диаграммах указывает на значение, полученное для контрольного состава — бездобавочного гипса.

Как видно из рис. 2, между факторами и откликами в проведенных исследованиях в основном имеет место очень слабая сила связи. Исключение составляет сила связи между фактором X_4 и откликом Y_1 , где отмечена слабая отрицательная сила связи.

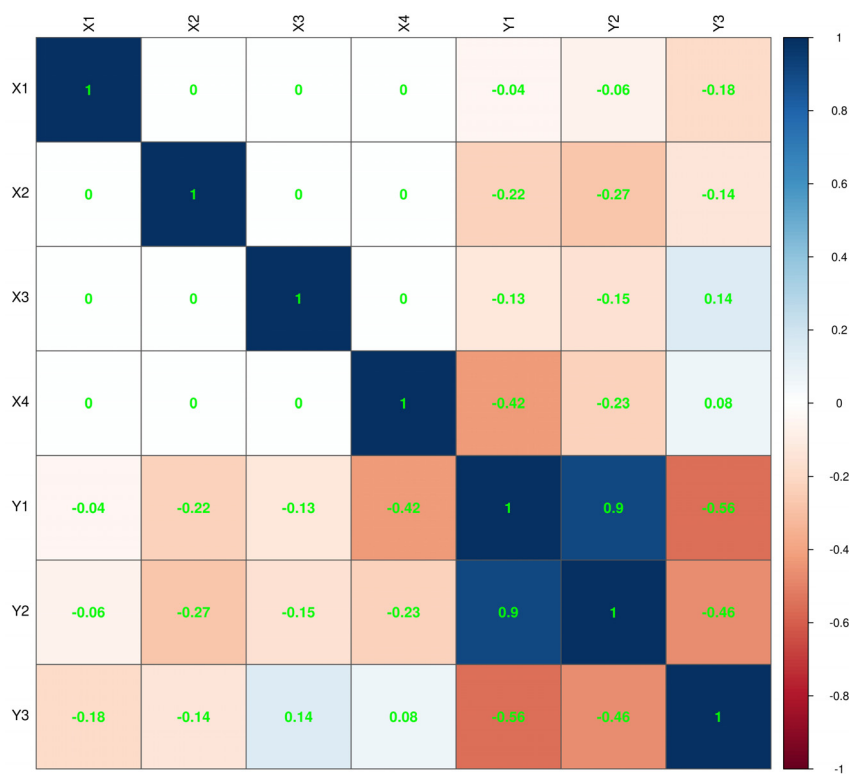


Рис. 2. Корреляционная матрица исследованных переменных

В случаях, когда объем полученных данных ограничен, целесообразно использовать непараметрические методы статистического анализа, в частности плотность распределения одномерной случайной величины. На рисунке 3 приведены диаграммы ядерной оценки функции плотности исследованных функций отклика. В нижней части диаграмм размещен график-щетка, показывающий реальные значения функций отклика, наложенных на прямую. Сплошными вертикальными линиями указаны значения, полученные у контрольного образца.

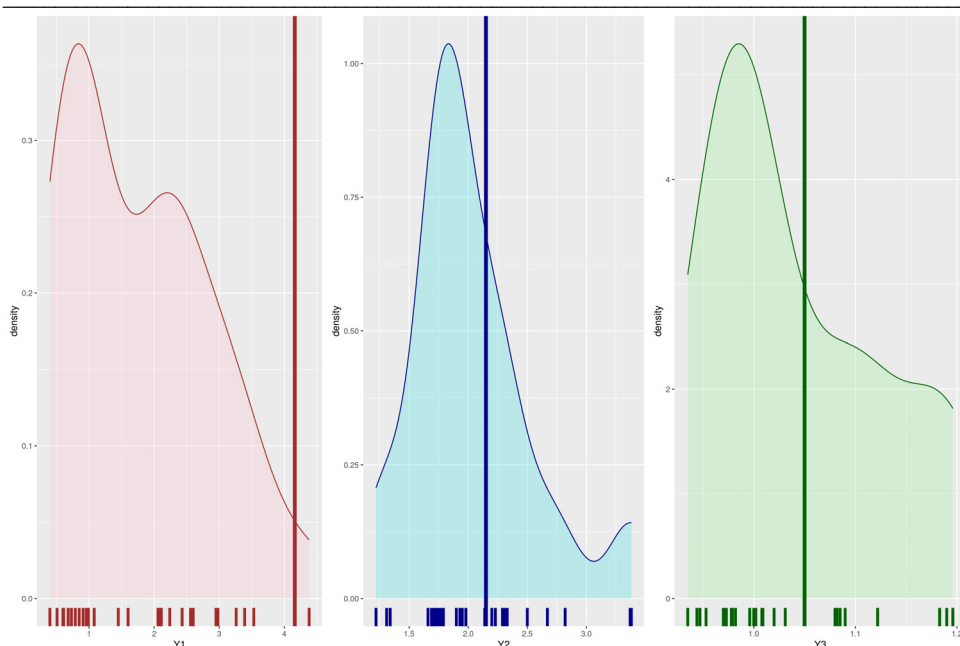


Рис. 3. Диаграммы ядерной оценки функции плотности для исследованных откликов

Приведенная на рис. 3 диаграмма ядерной функции плотности для предела прочности при сжатии Y_1 представляет собой бимодальное распределение со смещением в сторону минимальных значений. Диаграмма для функции отклика Y_2 имеет наибольшее сходство с распределением Лапласа, несмотря на небольшой пик в области 3,5 МПа. Диаграмма для функции отклика Y_3 по форме приближается к распределению Лапласа, однако имеет более пологую форму кривой средней плотности в областях, превышающих 1,05 кг/л. Данные, полученные в ходе проведения исследований, позволили построить графики влияния и с их помощью оценить значимость факторов и взаимодействий. На рисунке 4 приведены диаграммы Парето для исследованных факторов.

Гистограммы Парето отображают абсолютное значение влияния факторов, взаимодействий и квадратов. Пунктирной линией указана граница, которая соответствует табличному значению критерия Стьюдента. Статистически значимыми являются факторы, взаимодействия и квадраты факторов, у которых рассчитанные значения критерия Стьюдента пересекают пунктирную линию, т. е. превышают табличные значения.

Длина каждого столбца пропорциональна значению t -статистики, рассчитанной для соответствующего эффекта. Любые столбцы, выходящие за пределы пунктирной линии, являются статистически значимыми на уровне значимости 5 %.

В случае функции отклика Y_1 существует один значительный эффект $X_4(D)$, а также значимая взаимосвязь между $X_1(A)$ и $X_2(B)$. Остальные факторы, взаимодействия и квадраты взаимодействий не являются статистически значимыми. Тем не менее в построении уравнения регрессии мы будем учитывать основные факторы для получения иерархической модели. Аналогич-

ным образом поступим и с функцией отклика Y_2 . В случае функции отклика Y_2 , когда значимых факторов, взаимодействий и квадратов факторов нет, будет построена иерархическая модель регрессии.

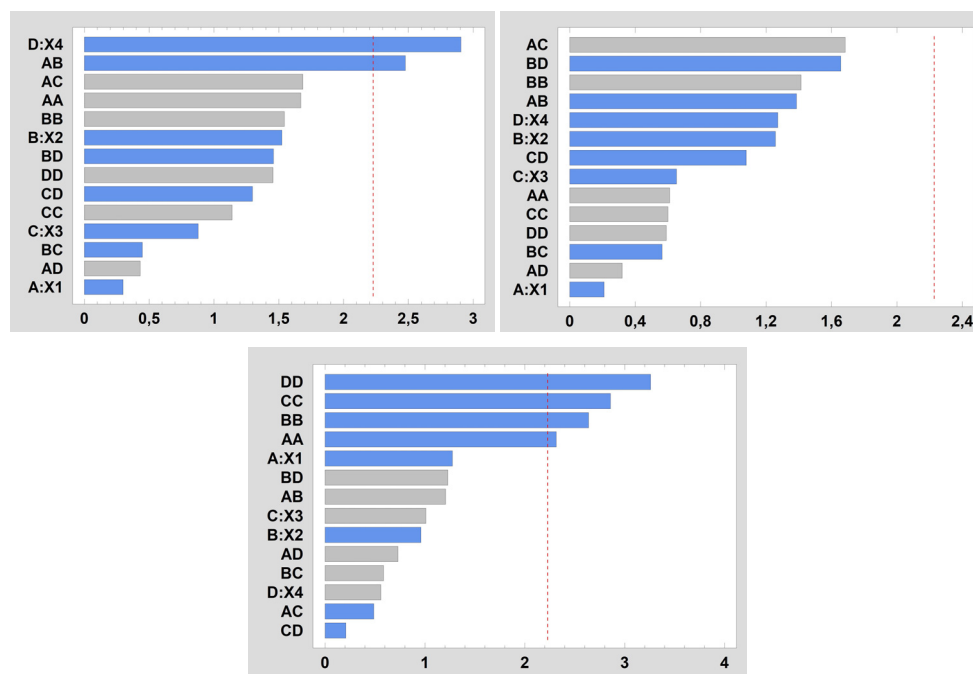


Рис. 4. Оценка влияния факторов по закону Парето для функций откликов Y_1 , Y_2 , Y_3 (сверху вниз)

Анализ результатов проведенных исследований позволил получить коэффициенты для полинома исследованных функций отклика, которые имеют вид:

$$Y_1 = 12,05 - 40,02X_1 + 0,24X_2 - 1,85X_3 - 2,73X_4 - 0,81X_1X_2 + \varepsilon; \quad (1)$$

$$Y_2 = 4,52 - 12,10X_1 + 0,08X_2 - 0,92X_3 + 0,89X_4 + \varepsilon; \quad (2)$$

$$Y_3 = -0,34 + 3,81X_1 + 0,01X_2 + 0,21X_3 + 0,48X_4 - 5,89X_1^2 - 0,0005X_2^2 - 0,03X_3^2 - 0,33X_4^2 + \varepsilon, \quad (3)$$

где ε — отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых для функций отклика Y_1 , Y_2 и Y_3 равна 0,86, 0,55 и 0,07 соответственно.

В формуле (3) имеются два члена с очень низкими коэффициентами, которые можно не учитывать, однако они не удалены из формулы потому, что являются значимыми.

Предварительную оценку адекватности моделей, полученных в результате исследований, можно произвести с использованием коэффициента детерминации R^2 . Коэффициент детерминации для функций отклика Y_1 , Y_2 и Y_3 составляет 75,18, 61,58 и 71,03 % соответственно, поэтому для функций отклика Y_1 и Y_3 характер связи можно оценить как высокий, так как изменение этого показателя у фиброгипса на 75,18 и 71,03 % зависит от исследованных

факторов, а на долю других факторов приходится только 24,82 и 28,97 % изменения этого показателя. Для функции отклика Y_2 характер связи можно оценить как умеренный, так как на долю неисследованных факторов приходится 38,42 %.

Как видно из формул, приведенных выше, наибольшее влияние на исследованные отклики оказывают следующие факторы: X_1 , X_3 и X_4 . Влияние фактора X_2 — инертной добавки — для всех откликов незначительно.

Для каждой из функций отклика построим контурные графики и графики поверхностей. Из всех возможных вариантов в качестве примера приведем графики зависимости функции отклика от факторов X_1 (расход фибры) и X_2 (расход минерального наполнителя) при постоянном значении фактора X_3 (расход суперпластификатора), равном 2,75 %, и постоянном значении фактора X_4 (расход редиспергируемого полимерного порошка), равном 1,25 %.

Как видно из рис. 5, максимальный предел прочности при сжатии можно получить в случае, если величина фактора X_1 будет стремиться к максимуму, а величина фактора X_2 будет находиться в зоне минимальных значений. Форму такой поверхности можно обозначить как «нисходящий гребень», так как минимальные значения предела прочности при сжатии будут характерны для диагонали, проходящей от минимальных значений факторов X_1 и X_2 до их максимальных значений.

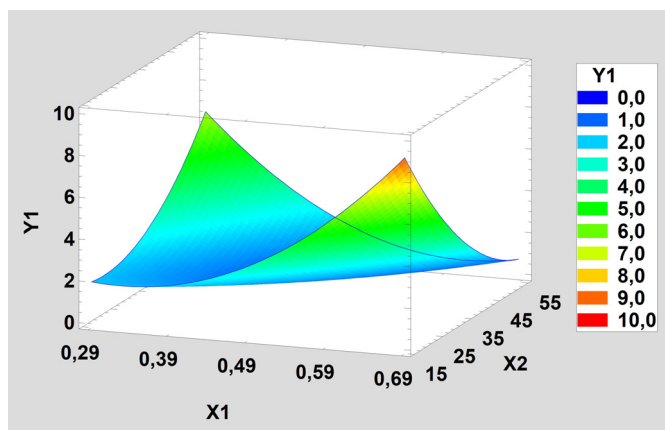


Рис. 5. График поверхности для функции отклика Y_1

График, приведенный на рис. 6, внешне схож с графиком, приведенным на рис. 5, по форме, однако различен по числовым значениям. Для отклика Y_2 , так же как и для отклика Y_1 , максимальные значения получены при максимальных величинах фактора X_1 и минимальных величинах фактора X_2 . Форму данной поверхности можно обозначить как выпуклую в двух плоскостях. Она позволяет наглядно отобразить минимальные и максимальные значения изучаемого отклика.

График, приведенный на рис. 7, имеет форму «перевернутой чаши». Анализ графиков целесообразно проводить совместно с графиками, приведенными на рис. 5 и 6. Наибольшие значения плотности фиброгипсового материала соответствуют расходу X_1 в интервале 0,39...0,42 % и расходу X_2 в интервале 27...29 %. Данные интервалы на рис. 5 и 6 соответствуют мини-

малыми значениями предела прочности фиброгипса при сжатии и изгибе. При расходе фактора X_2 в интервале 15...20 % и расходе фактора X_1 , близком к верхней границе и превышающем верхнюю границу, средняя плотность фиброгипса значительно уменьшается, однако при этом наблюдается рост предела прочности при сжатии и изгибе. Подобный результат можно получить и при расходе фактора X_2 37 % и более и расходе фактора X_1 0,4 % и менее.

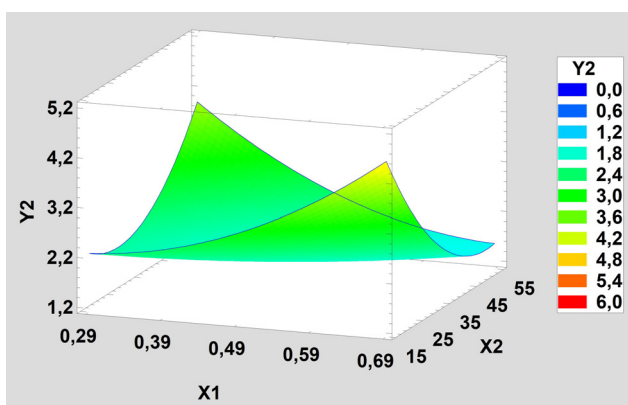


Рис. 6. График поверхности для функции отклика Y_2

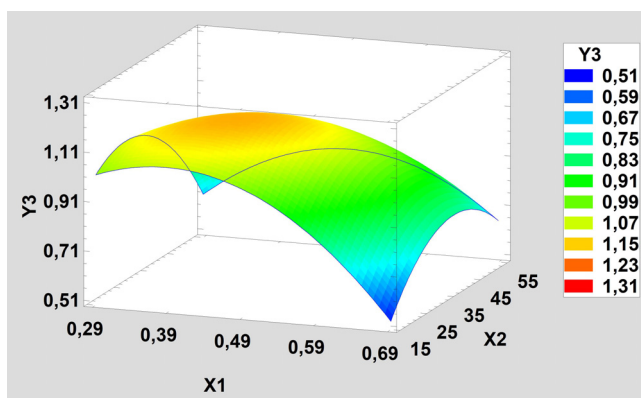


Рис. 7. График поверхности для функции отклика Y_3

Проведена оптимизация состава комплексной добавки для получения максимальной прочности фиброгипса при сжатии. Максимальный предел прочности при сжатии, который возможно получить, используя имеющиеся материалы и полученное уравнение регрессии, составляет 10,51 МПа. При этом расход полипропиленовой фибры будет составлять 0,3 %, инертной добавки — 50,0 %, суперпластификатора — 0,5 % и редispersируемого полимерного порошка — 0,53 %.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработанная комплексная модифицирующая добавка позволяет получить фиброгипс, сопоставимый по прочности с исходным гипсовым вяжущим, заместив тонкомолотой инертной добавкой часть вяжущего вещества.

2. Анализ полученных результатов исследований позволил получить уравнения регрессии, описывающие зависимости функций отклика от факторов и их взаимодействий для фиброгипса. Подтверждена значимость и адекватность полученных моделей.

3. Установлено, что дисперсное армирование оказывает положительное влияние на физико-механические свойства фиброгипса.

4. Проведена оптимизация фиброгипса по прочности и установлен состав комплексной добавки, позволяющий получить максимальную прочность фиброгипса при сжатии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Р. З. Гипс в строительстве с древних веков до современности // ACADEMIA. Архитектура и строительство. 2021. № 4. С. 120—124. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-120-124.

2. Подымская А. Т., Черноусенко Г. И., Волокутина А. В. Технология получения гипсового вяжущего. Производство строительного гипса, фиброгипса // Химия, физика и механика материалов. 2021. № 1(28). С. 84—100.

3. Khalil A. A., Tawfik A., Hegazy A. A. Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 167. Pp. 55—64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01165.

4. Пудовкин А. Н., Юдин А. А., Ганеева Э. И., Парфенова А. А. Применение отходов гипсового производства в стеновых строительных материалах // Вестник Евразийской науки. 2021. Т. 13. № 1. С. 12.

5. Бессонов И. В., Жуков А. Д., Горбунова Э. А. Гипсосодержащие модифицированные материалы // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 18—26.

6. Turemuratov Sh. N., Akhmedov U. K. Regulation of the properties of construction gypsum by the admixtures // European science. 2019. № 5(47). Pp. 10—13.

7. Бернацкий А. Ф., Голубев М. Б. Использование уксусной кислоты в качестве замедлителя сроков схватывания гипсового вяжущего // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4(23). С. 36—40.

8. Хозин В. Г., Майсурадзе Н. В., Мустафина А. Р., Корнянен М. Е. Влияние химической природы пластификаторов на свойства гипсового теста и камня // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 35—39.

9. Шаринзаде И. Н., Баширов Е. Х., Курбанова И. Д. Исследование влияния ультрадисперсного метакаолина на свойства гипсовых вяжущих // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 79—82.

10. Properties of cellulosic fiber reinforced plaster: influence of hemp or flax fibers on the properties of set gypsum / P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, P. Krausz // Journal of Materials Science. 2010. Vol. 45. Pp. 793—803.

11. Байрамуков С. Х., Долаева З. Н., Агабабян В. С. Исследование фибропенотуфобетона и разработка технологии производства стеновых блоков // Известия Северо-Кавказской государственной академии. 2020. № 2(24). С. 3—8.

12. Ляшенко Д. А., Соколов П. Э., Перфилов В. А. Вспененный фиброгипсовый материал // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4(76). С. 430—437. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6924>.

13. Мокрова М. В., Соловьянова С. Г. Перспективы повышения эксплуатационных свойств искусственного камня // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 11(779). С. 42—49.

14. Гипсовые материалы, модифицированные комплексной добавкой на основе наносилики / М. Д. Батова, Н. С. Жукова, А. Ф. Гордина, Г. И. Яковлев, А. В. Шайбадуллина, А. Э. М. М. Эльрефай, З. Орбан // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 64—71.

15. Соколов П. Э., Молчанов К. О., Крахоткин С. М., Лукиных С. В. Оценка влияния комплексной добавки на водопоглощение фиброгипса // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4(100). С. 684—700. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8369>.

16. Исследование эффективности применения панелей из фиброгипса в строительстве с использованием отходов пиления ракушняка / А. Т. Семенова, А. Н. Цыплаков, Г. И. Черно-

усенко, О. В. Шокин, О. Б. Кукина, Е. А. Хорохордина // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 2(25). С. 25—27.

© Акчурин Т. К., Соколов П. Э., Поляков В. Г., Душко О. В., Лупиногин В. В., 2024

Поступила в редакцию
в августе 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Разработка состава и анализ основных свойств фиброгипса / Т. К. Акчурин, П. Э. Соколов, В. Г. Поляков, О. В. Душко, В. В. Лупиногин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 3(96). С. 23—33. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_23.

Об авторах:

Акчурин Талгат Кадимович — советник РААСН, канд. техн. наук, проф., проф. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; Scopus ID: 57190967539; info@vgasu.ru

Соколов Петр Эдуардович — канд. техн. наук, доц., и. о. зав. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; smist2012-2013@yandex.ru

Поляков Владимир Геннадиевич — д-р экон. наук, проф., зав. каф. городского строительства, экономики и управления проектами, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; polyakovvg@vgasu.ru

Душко Олег Викторович — д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ORCID: 0000-0002-3982-1899; ovd28@mail.ru

Лупиногин Владислав Владимирович — канд. техн. наук, преподаватель каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Talgat K. Akchurin, Petr E. Sokolov, Vladimir G. Polyakov, Oleg V. Dushko, Vladislav V. Lupinogin

Volgograd State Technical University

DEVELOPMENT OF COMPOSITION AND ANALYSIS OF THE BASIC PROPERTIES OF FIBROGYPSUM

The article presents the results of research aimed at developing fibrogypsum using gypsum binder and a complex modifying additive. The main condition for obtaining fibrogypsum was to reduce the consumption of the binder through the use of finely ground inert mineral powder, while maintaining the strength characteristics of the original gypsum binder. A preliminary analysis of the results of the studies made it possible to obtain their descriptive statistics, with the help of which the influence and degree of influence of factors on the studied responses was established. Processing of research results made it possible to obtain the dependence of the main physical and mechanical properties of fibrogypsum on the studied factors. The composition of the complex additive was optimized to obtain maximum strength of fiber gypsum. The obtained research results make it possible to obtain fiber gypsum with specified physical and mechanical properties, provided that the consumption of gypsum binder is reduced.

Key words: gypsum binder, complex additive, fibrogypsum, properties, experimental planning, regression equations.

For citation:

Akchurin T. K., Sokolov P. E., Polyakov V. G., Dushko O. V., Lupinogin V. V. [Development of composition and analysis of the basic properties of fibrogypsum]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 3, pp. 23–33. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_23.

About authors:

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; Scopus ID: 57190967539; info@vgasu.ru

Petr E. Sokolov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; smist2012-2013@yandex.ru

Vladimir G. Polyakov — Doctor of Economics, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; polyakovvg@vgasu.ru

Oleg V. Dushko — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3982-1899; ovd28@mail.ru

Vladislav V. Lupinogin — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation