

Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей

Акымбек Абдыкалыков¹ , Жанболот Качкынбаевич Айдаралиев^{1*} , Жыпаргуль Абдыкалык кызы² , Нематилла Абдилахатович Сопубеков³ , Акжол Суйунбек уулу² 

¹ Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, корпус № 1, ауд.: 1/432, Кыргызстан

² Институт физики имени Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызстан

³ Ошский технологический университет, Ош, 723503, ул. Исанова 81, Кыргызстан

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: janlem@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из наиболее перспективных материалов для дисперсного армирования бетонов является базальтовое волокно. Оно характеризуется высокой прочностью, термической и химической стойкостью, а также экологической безопасностью. Применение армирующих фибр позволяет значительно повысить прочность бетона при изгибе и растяжении, а также улучшить его водостойкость и устойчивость к динамическим нагрузкам. Ряд исследований показывает, что введение базальтовой фибры способствует повышению прочности композитов на сжатие и изгиб, а также увеличению их трещиностойкости. При оптимальном содержании волокон формируется пространственный армирующий каркас, который повышает энергоёмкость разрушения материала и его устойчивость к внешним воздействиям. **Методы и материалы.** С целью определения оптимального состава фибробетона был проведён пятифакторный эксперимент по плану Na_5 . Были выбраны следующие компоненты рецептурного состава: мраморная крошка (МК), мраморный порошок (МП), мраморная пыль (М-пыль), базальтовые фибры (ФБ), полипропиленовые фибры (ФП), а также связующее – портландцемент. Фибробетоны изготавливались по следующей технологии: мраморные наполнители различных фракций, армирующие фибры и портландцемент предварительно перемешивались в сухом состоянии в течение 10 минут, после чего добавлялось необходимое количество воды. Полученная смесь перемешивалась в течение 30 минут и формовалась в специальные формы для проведения физико-технических исследований. Через 24 часа образцы подвергались обработке водяным паром в течение 30 минут, после чего через трое суток проводились испытания на плотность, водопоглощение и прочность. В соответствии с планом эксперимента типа Na_5 было получено 27 составов фибробетона. По результатам эксперимента методом наименьших квадратов были определены коэффициенты регрессии и модели исследуемых свойств фибробетона с мраморными наполнителями. Также были построены графические образы экспериментально-статистических моделей в виде двумерных номограмм.

Результаты. Установлено, что комбинированное армирование базальтовыми (ФБ) и полипропиленовыми (ФП) фибрами возможно, однако требует оптимизации их соотношения. Наиболее эффективной является схема, при которой основная армирующая роль принадлежит базальтовым фибрам (2–3%), тогда как полипропиленовые фибры вводятся в небольших количествах (до 1–2%) для контроля трещинообразования. Анализ графических областей и производных функций показал следующий оптимальный диапазон содержания компонентов: мраморная крошка – 25–30%, мраморный порошок – 10–15%, мраморная пыль – около 12%, базальтовые фибры – 2–4%, полипропиленовые фибры – 0–2%. **Заключение.** Базальтовые фибры являются эффективным средством повышения прочностных характеристик фибробетона при умеренном содержании (около 2–3%). Однако их избыточное количество приводит к снижению плотности и увеличению водопоглощения материала. Полипропиленовые фибры в большинстве случаев снижают плотность и прочность на сжатие и увеличивают водопоглощение, поэтому их применение целесообразно ограничивать малыми дозами и использовать преимущественно для повышения трещиностойкости. Наилучший комплекс физико-механических свойств достигается при использовании мраморной пыли в сочетании с базальтовой фиброй.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, базальтовое волокно, фибры базальтовые, фибры полипропиленовые, экспериментально-статическое моделирование, прочность фибробетона, номограммы

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная научная работа выполнена при поддержке Министерства науки, высшего образования и инноваций Кыргызской Республики. Проект имеет регистрационный номер № 240032 от 15.02.2024 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Сопубеков Н.А., Суйунбек уулу А. Оптимизация волокнистого бетона с полипропиленовыми и базальтовыми волокнами с использованием мраморных заполнителей. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):192–209. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-192-209>. – EDN: XKNLAR.

Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers

Akymbek Abdykalykov¹ , Zhanbolot K. Aidaraliev^{1*} , Zhympargul Abdykalyk kyzy² ,
Nematilla A. Sopubekov³ , Akzhol Suiunbek uulu² 

¹ Department of Physics, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aitmatov Avenue 66, Building № 1, Room: 1/432, Kyrgyzstan

² Institute of Physics named after Zh. Zheenbaev, National Academy of Sciences, Bishkek, 720071, Chuy Avenue 265a, Kyrgyzstan

³ Osh Technological University, Osh, 723503, Isanova Street 81, Kyrgyzstan

* Corresponding author: e-mail: janlem@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. One of the most promising materials for dispersed reinforcement of concrete is basalt fiber. It is characterized by high strength, thermal and chemical resistance, as well as environmental safety. The use of reinforcing fibers significantly increases the flexural and tensile strength of concrete and improves its water resistance and resistance to dynamic loads. A number of studies show that the introduction of basalt fiber contributes to an increase in the compressive and flexural strength of composites, as well as their crack resistance. With an optimal fiber content, a spatial reinforcing framework is formed, which increases the energy capacity of material fracture and its resistance to external influences. **Methods and materials.** Fiber-reinforced concretes were produced using the following technology: marble fillers of different fractions, reinforcing fibers, and Portland cement were first mixed in a dry state for 10 minutes, after which the required amount of water was added. The resulting mixture was stirred for 30 minutes and molded into special forms for physical and technical studies. After 24 hours, the samples were treated with water steam for 30 minutes, after which, after three days, tests for density, water absorption, and strength were carried out. According to the experimental plan of the H₅ type, 27 compositions of fiber-reinforced concrete were obtained. Based on the experimental results, regression coefficients of models describing the studied properties of fiber-reinforced concrete with marble fillers were determined using the least squares method. Graphical representations of the experimental–statistical models were also constructed in the form of two-dimensional nomograms. **Results.** It was established that combined reinforcement with basalt fibers (BF) and polypropylene fibers (PF) is possible but requires optimization of their ratio. The most effective scheme is when the main reinforcing role belongs to basalt fibers (2–3%), while polypropylene fibers are introduced in small amounts (up to 1–2%) to control crack formation. The analysis of graphical regions and derivative functions showed the following optimal range of component contents: marble chips – 25–30%, marble powder – 10–15%, marble dust – about 12%, basalt fibers – 2–4%, polypropylene fibers – 0–2%. **Conclusion.** Basalt fibers are an effective means of increasing the strength characteristics of fiber-reinforced concrete at moderate content (about 2–3%). However, their excessive amount leads to a decrease in density and an increase in water absorption of the material. Polypropylene fibers in most cases reduce density and compressive strength and increase water absorption; therefore, their use should be limited to small doses and mainly applied to improve crack resistance. The best complex of physical and mechanical properties is achieved when marble dust is used in combination with basalt fiber.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, basalt fiber, basalt fibers, polypropylene fibers, experimental-statistical modeling, strength of fiber-reinforced concrete, nomograms

ACKNOWLEDGMENTS: This research was carried out with the support of the Ministry of Science, Higher Education and Innovation of the Kyrgyz Republic. Registration No. 240032, 15.02.2024.

FOR CITATION:

Abdykalykov A., Aidaraliev Z.K., Abdykalyk kyzy Zh., Sopubekov N.A., Suiunbek uulu A. Optimization of fiber-reinforced concrete with polypropylene and basalt fibers using marble fillers. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):192–209. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-192-209>. – EDN: XKNLAR.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве широко применяются армированные бетонные материалы, что обусловлено недостатками обычного бетона, такими как низкая прочность на растяжение, низкая ударная стойкость и склонность к образованию усадочных трещин. Традиционно повышение прочностных характеристик бетона достигается использованием стальной арматуры или металлических сеток. В последние годы активно развивается технология дисперсного армирования бетонных матриц с применением различных волокон, включая стальные, стеклянные, базальтовые и полимерные волокна [1–7].

Дисперсное армирование способствует повышению трещиностойкости, пластичности и долговечности бетона, а также снижению массы конструкций. В отличие от традиционного армирования металлической сеткой, фиброволокна препятствуют образованию трещин на ранних стадиях твердения бетона, когда материал находится в пластическом состоянии [8–11].

Полимерные волокна, в частности полипропиленовые, широко применяются благодаря коррозионной стойкости и технологичности [12–15]. Однако их использование ограничивается сравнительно низкой адгезией к цементной матрице и снижением прочностных характеристик при длительной эксплуатации. Металлические волокна обладают высокой прочностью, однако подвержены коррозии и могут проявлять катодный эффект в агрессивных средах цементных растворов.

Стекловолокно также применяется для армирования цементных композитов, однако его долговечность во многом зависит от щелочной среды цементного камня. Установлено, что продукты гидратации портландцемента могут оказывать отрицательное воздействие на стекловолокно, тогда как использование глиноземистых цементов позволяет повысить его химическую стойкость [16].

Исследования показывают, что применение базальтовых и полимерных волокон позволяет значительно повысить морозостойкость, ударную вязкость и сопротивление трещинообразованию фибробетонов. Кроме того, использование дисперсного армирования способствует равномерному распределению напряжений в бетонной матрице и повышению долговечности конструкций [16–16]. Совместное применение различных минеральных наполнителей и фибры способствует повышению физико-механических и эксплуатационных свойств фибробетонов [20–25].

Фибробетоны находят широкое применение в промышленном и гражданском строительстве, транспортной инфраструктуре и гидротехнических сооружениях. Их использование позволяет повысить

устойчивость конструкций к динамическим нагрузкам, температурным воздействиям и агрессивным средам. Однако более высокая стоимость фибробетонов по сравнению с традиционными бетонами остается одним из факторов, ограничивающих их широкое применение [26–35].

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что дисперсное армирование бетонов различными видами волокон является эффективным способом повышения их прочностных и эксплуатационных характеристик. Среди различных видов армирующих волокон особый интерес представляет базальтовое волокно, обладающее высокой прочностью, химической стойкостью и перспективами широкого применения в строительных композиционных материалах.

Целью исследований является оптимизация рецептурных факторов и свойств композиционного материала на цементном вяжущем с использованием мраморных наполнителей и дисперсного армирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении экспериментальных работ был проведен 5-ти-факторный эксперимент по плану H_{52} (табл. 2), где варьировалось 5 рецептурных факторов: X_1 – мраморная крошка (МК), %; X_2 – мраморный порошок (МП), %; X_3 – мраморная пыль (М-пыль), %; X_4 – фибры базальтовые (ФБ), %; X_5 – фибры полипропиленовые (ФП), %; **остальное – портландцемент**. Уровни варьирования 5-ти факторов представлены в таблице 1.

Показателями качества композиционного материала были выбраны: Y_1 – ($R_{сж}$). Прочность на сжатие, МПа; Y_2 – прочность на растяжение, %; Y_3 – водопоглощение; Y_4 – (ρ) плотность, кг/м³.

По результатам эксперимента методом наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты регрессии моделей выбранных свойств композиционного материала (1–6). Также были построены графические образы ЭС-моделей в виде двумерных номограмм (рис. 1–8).

Экспериментальные образцы изготавливались по следующей технологии: мраморные наполнители различной фракции, армирующие фибры и портландцемент перемешивали в сухом состоянии в течение 10 минут, после чего добавляли необходимое количество воды. Полученную смесь перемешивали в течение 30 минут и формовали в специальные формы для проведения испытаний. Через 24 часа образцы композитов подвергали обработке водяным паром в течение 30 минут. После трех суток выдерживания проводили испытания на плотность, водопоглощение и прочность.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Уровни факторов	Значение факторов				
	X ₁ МК, %	X ₂ МП, %	X ₃ М-пыль, %	X ₄ ФБ, %	X ₅ ФП, %
-1	20	5	4	0	0
0	25	10	8	2	2
1	30	15	12	4	4

Таблица 2. План эксперимента типа Na₅

№	Нормализованные переменные					Натуральные переменные					Свойства	
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	X ₁ -МК, %	X ₂ - МП, %	X ₃ - М- пыль, %	X ₄ - ФБ, %	X ₅ - ФП, %	Y ₁ - плотность, кг/м ³	Y ₂ - водопогло- щение, %
1	+	+	+	+	+	30	15	12	4	4	1270	27
2	-	-	+	+	+	20	5	12	4	4	1271	25,2
3	-	+	-	-	-	20	15	4	0	0	1544	17,4
4	+	-	-	-	-	30	5	4	4	4	1280	22,3
5	-	+	-	+	+	20	15	4	4	4	1330	14,7
6	+	-	-	+	+	30	5	4	4	4	1350	12,6
7	+	+	+	-	-	30	15	12	0	0	1940	9,3
8	-	-	+	-	-	20	5	12	0	0	1950	14,2
9	-	+	+	+	-	20	15	12	4	0	1480	15,4
10	+	-	+	+	-	30	5	12	4	0	1490	12
11	+	+	-	-	+	30	15	4	0	4	1470	20,4
12	-	-	-	-	+	20	5	4	0	4	1465	8
13	-	+	+	-	+	20	15	12	0	4	1615	9
14	+	-	+	-	+	30	5	12	0	4	1640	10,3
15	+	+	-	+	-	30	15	4	4	0	1590	10,5
16	-	-	-	+	-	20	5	4	4	0	1585	11,3
17	+	0	0	0	0	30	10	8	2	2	1760	11
18	-	0	0	0	0	20	10	8	2	2	1757	9,2
19	0	+	0	0	0	25	15	8	2	2	1689	12
20	0	-	0	0	0	25	5	8	2	2	1630	12,7
21	0	0	+	0	0	25	10	12	2	2	1645	13
22	0	0	-	0	0	25	10	4	2	2	1666	12
23	0	0	0	+	0	25	10	8	4	2	1488	11
24	0	0	0	-	0	25	10	8	0	2	1515	12
25	0	0	0	0	+	25	10	8	2	4	1576	12,7
26	0	0	0	0	0	25	10	8	2	2	1482	13,6
27	0	0	0	0	0	25	10	8	2	0	1564	12,7

Таблица 2. План эксперимента типа Na_5

№	Результаты эксперимента			
	Y_1 - плотность, кг/м ³	Y_2 - водопоглощение, %	Y_3 - прочность на сжатие, МПа	Y_4 - прочность на изгиб, МПа
1	1270	27	0,150	2,60
2	1271	25,2	0,145	2,66
3	1544	17,4	0,190	5,00
4	1280	22,3	0,800	5,11
5	1330	14,7	0,126	5,12
6	1350	12,6	0,140	9,37
7	1940	9,3	0,142	1,875
8	1950	14,2	0,996	2,093
9	1480	15,4	0,936	8,43
10	1490	12	10,110	5,625
11	1470	20,4	0,950	4,30???
12	1270	8	1,110	5,620
13	1615	9	1,360	7,370
14	1640	10,3	1,620	1,775
15	1590	10,5	2,061	1,357
16	1585	11,3	1,312	0,130
17	1760	11,0	9,372	0,040
18	1757	9,2	1,52	0,140
19	1689	12	2,610	0,110
20	1630	12,7	2,322	0,092
21	1645	13	8,123	0,012
22	1666	12	7,971	0,011
23	1488	11	1,560	0,012
24	1515	12	0,821	0,026
25	1576	12,7	1,08	0,034
26	1482	13,6	1,310	0,050
27	1564	12,7	1,920	0,007

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (плотность, кг/м}^3\text{)} = & 1637,03 - 28,67 x_1 + \\
 & + 32,0 x_2 + 73,8 \cdot x_3 - 75,5 x_4 - 68,39 x_5 + \\
 & + 102,09 \cdot x_1^2 + 3,09 \cdot x_2^2 - 0,91 \cdot x_3^2 - \\
 & - 154,91 x_4^2 - 86,41 \cdot x_5^2 + 70,07 x_1 x_2 + \\
 & + 35,44 \cdot x_1 x_3 + 30,19 \cdot x_1 x_4 + 32,06 \cdot x_1 x_5 - \\
 & - 38,07 x_2 x_3 - 29,06 \cdot x_2 x_4 - 30,94 \cdot x_2 x_5 - \\
 & - 120,94 \cdot x_3 x_4 - 55,31 x_3 x_5 - 44,32 x_4 x_5. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Анализ влияния факторов

По коэффициентам и числовым расчетам установлено:

Увеличение плотности обеспечивает:

- повышение содержания мраморной пыли (X_3) – наиболее сильное влияние;
- уменьшение базальтовой (X_4) и полипропиленовой (X_5) фибры;
- взаимодействие $X_1 X_2$ положительно влияет на плотность;
- отрицательные взаимодействия ($X_3 X_4$, $X_3 X_5$, $X_4 X_5$) свидетельствуют о том, что при одновременном росте наполнителя и фибр образуется более пористая структура.

Квадратичные члены показывают оптимум:

- x_1^2 увеличивает плотность → оптимум вблизи верхней границы мраморной крошки,
- x_4^2 и x_5^2 уменьшают плотность → увеличение армирования выше определенного уровня приводит к дефектности структуры.

Практическое значение модели:

1. Модель позволяет прогнозировать плотность во всем диапазоне рецептур.

2. Обеспечивает поиск оптимального состава методом частных производных, поверхности отклика, функции желательности Харрингтона.

3. Позволяет исключить материалы, ухудшающие свойства при определенных комбинациях.

4. Дает возможность проектировать составы без проведения полного цикла испытаний.

После реализации эксперимента и расчета коэффициентов регрессии моделей свойств КМ (композиционного материала) их анализ проводился для двух типов КМ:

1. Композиционный материал на модифицированном цементном вяжущем и фибре базальтовой (КМ_Б) (Фибра полипропиленовая – 0%).

2. Композиционный материал на модифицированном цементном вяжущем и фибре полипропиленовой (КМ_П) (фибра базальтовая – 0%)

На основе полученной ЭС-модели (1) свойств композиционного материала путем подстановки факторов x_4 и $x_5 = -1$ были получены модели свойств двух разных цементных композиций: для КМ_Б при ($x_5 = -1$, $X_5 = 0\%$) и КМ_П при ($x_4 = -1$, $X_4 = 0\%$).

КМ_Б ($x_5 = -1$, $X_5 = 0\%$)

5-ти факторная модель Y_1 преобразована в 4-х факторную $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (плотность, кг/м}^3\text{)} = & 1619,01 - 60,73 x_1 + \\
 & + 62,94 x_2 + 129,11 x_3 - 31,18 x_4 + \\
 & + 102,09 \cdot x_1^2 + 3,09 \cdot x_2^2 - 0,91 \cdot x_3^2 - \\
 & - 154,91 x_4^2 + 70,07 x_1 x_2 + 35,44 \cdot x_1 x_3 + \\
 & + 30,19 \cdot x_1 x_4 - 38,07 x_2 x_3 - 29,06 \cdot x_2 x_4 - \\
 & - 120,94 \cdot x_3 x_4 \quad (2)
 \end{aligned}$$

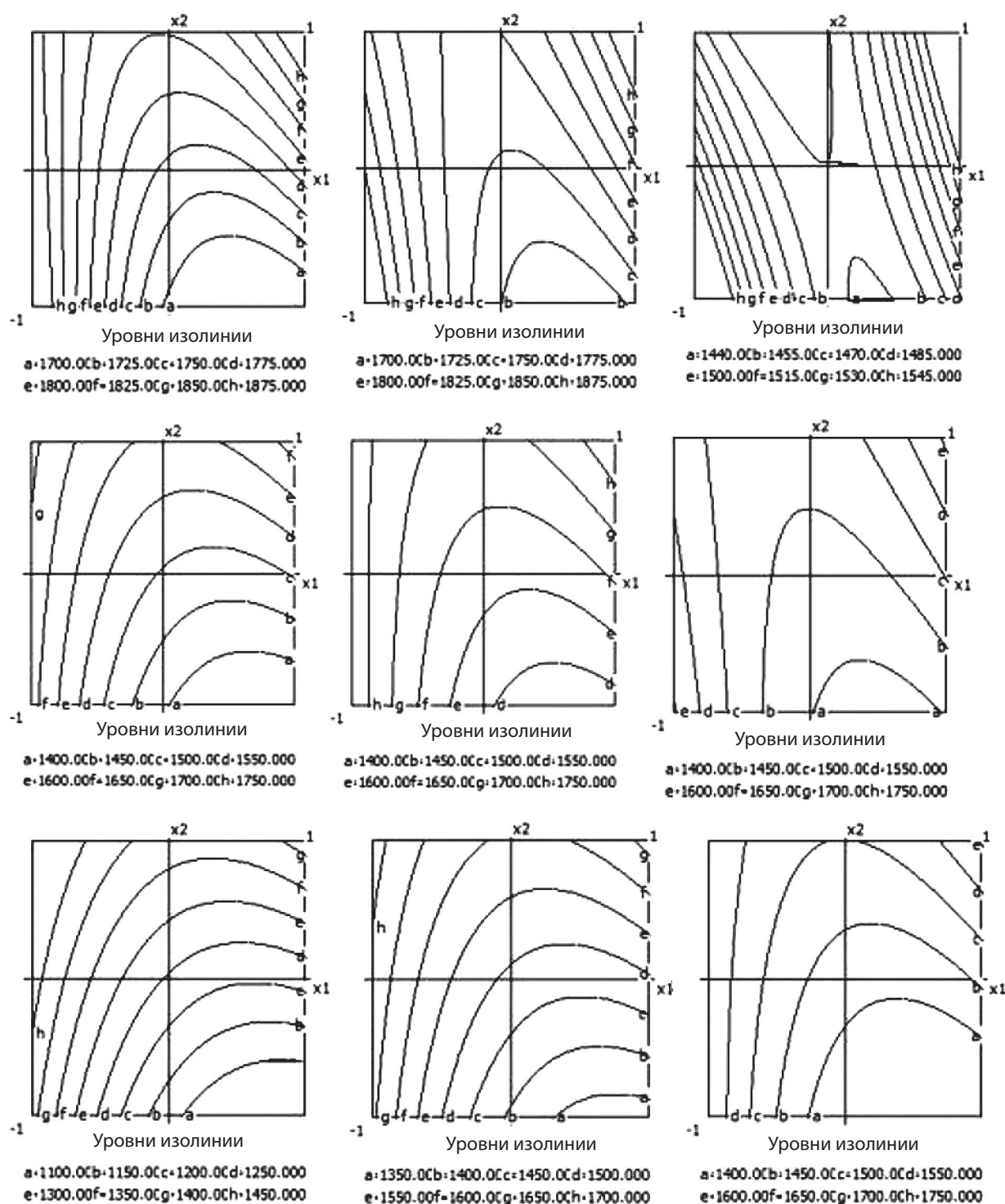


Рис. 1. Область рецептов композиционного материала $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

КМ_П ($x_4 = -1, X_4 = 0\%$).

5-ти факторная модель Y_1 преобразована в 4-х факторную $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при условии $X_4 = -1$ ($x_4 = -1$, без Фибры баз. = 0%)

$$\begin{aligned}
 Y_1 \text{ (плотность, кг/м}^3\text{)} = & 1557,62 - 58,86 x_1 + \\
 & + 61,06 x_2 + 194,74 x_3 - 24,07 x_5 + \\
 & + 102,09 x_1^2 + 3,09 x_2^2 - 0,91 x_3^2 - 86,41 x_5^2 + \\
 & + 70,07 x_1 x_2 + 35,44 x_1 x_3 + 32,06 x_1 x_5 - \\
 & - 38,07 x_2 x_3 - 30,94 x_2 x_5 - 55,31 x_3 x_5
 \end{aligned} \quad (3)$$

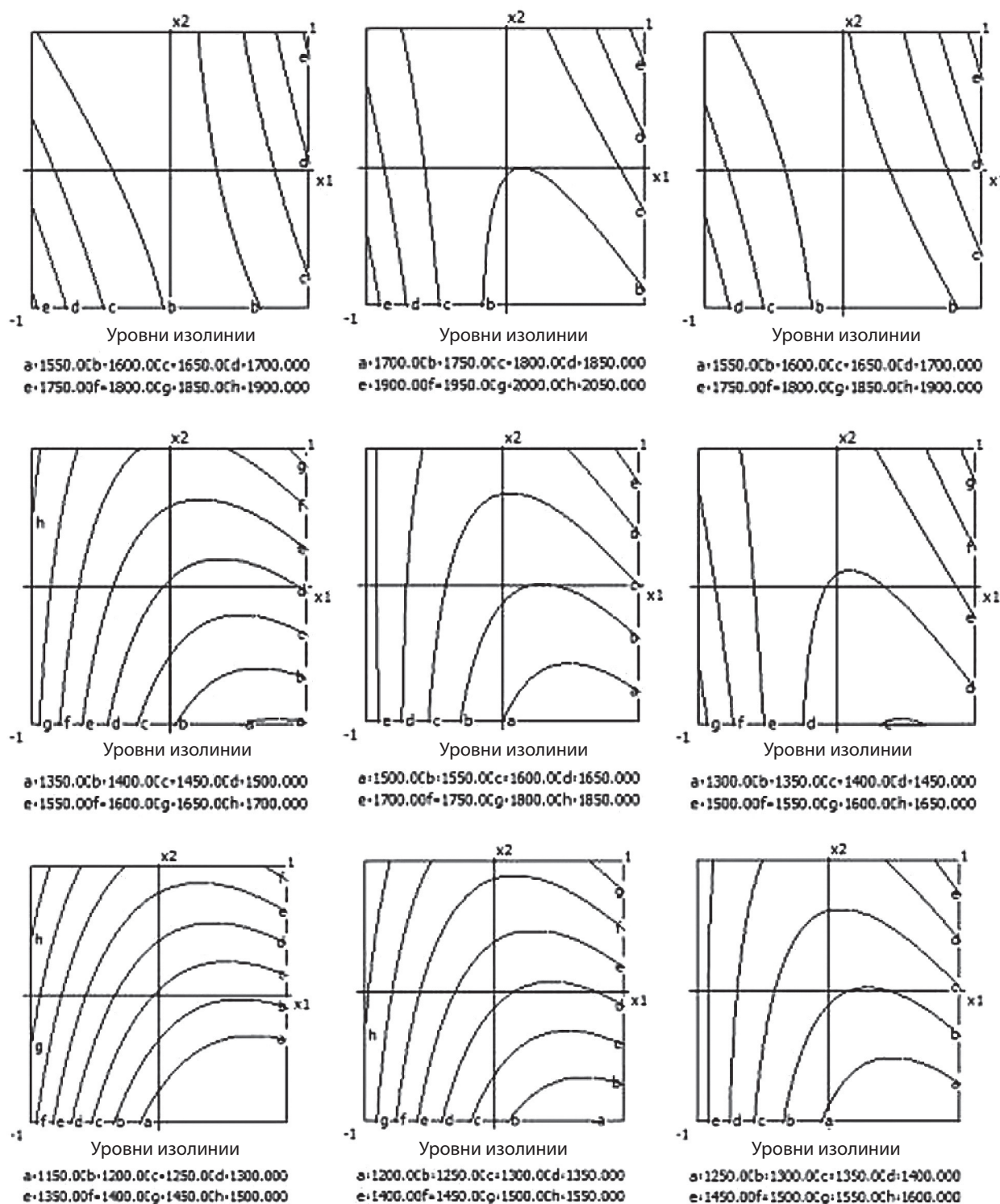


Рис. 2. Область рецептов композиционного материала $Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_4 = -1$ ($x_4 = -1$, без Фибры баз. = 0%)

По результатам пятифакторного эксперимента типа N_{25} была получена квадратичная регрессионная модель плотности композиционного материала (уравнение 1), учитывающая линейные, квадратичные и попарные взаимодействия факторов.

Анализ коэффициентов регрессии показывает, что наибольшее влияние на плотность оказывает содержание мраморной пыли (X_3), а также количество базальтовых (X_4) и полипропиленовых (X_5) фибр.

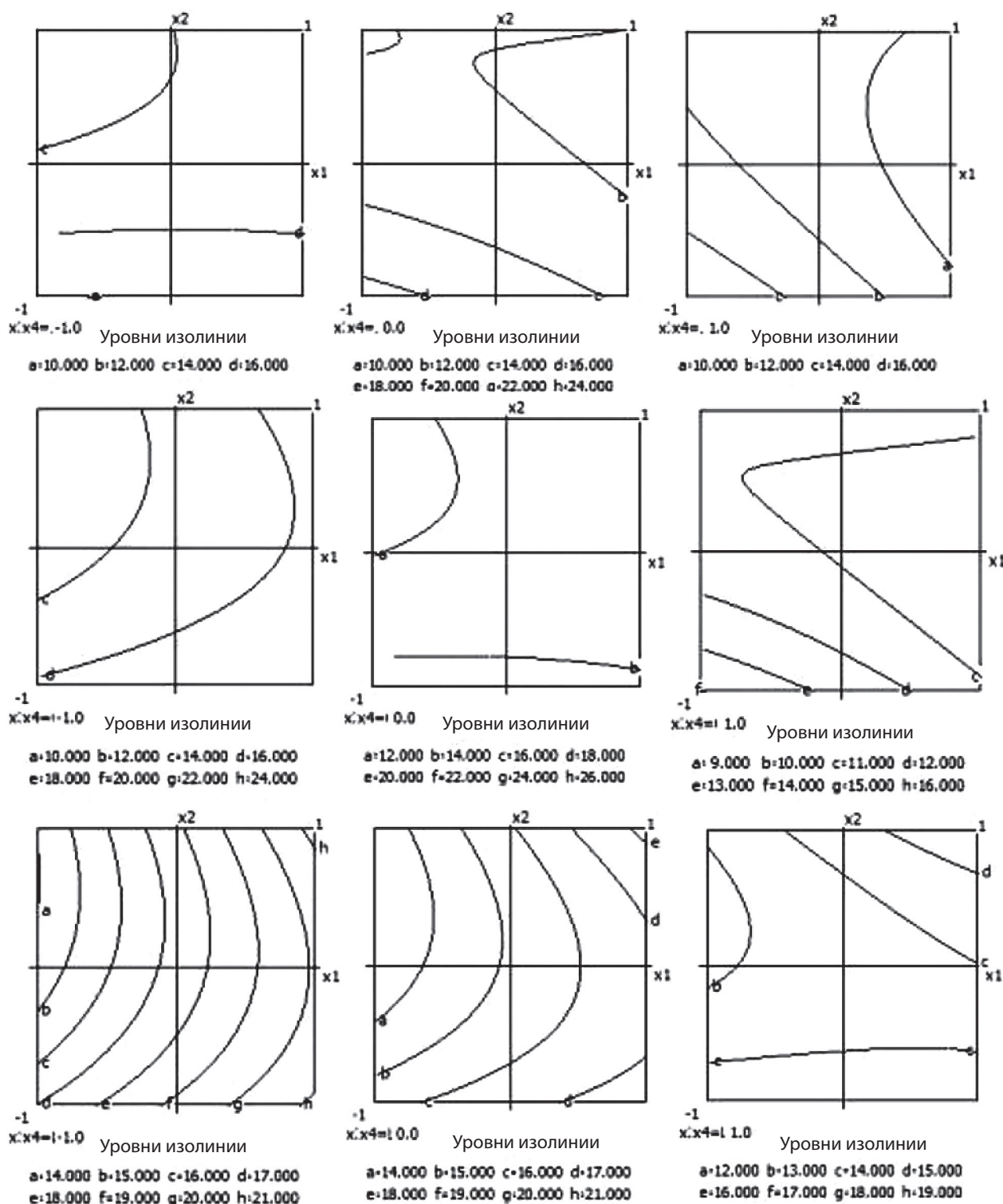


Рис. 3. Водопоглощение композиционного материала $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

Положительный коэффициент при факторе X_3 свидетельствует о том, что увеличение доли мраморной пыли способствует повышению плотности композиционного материала. Это объясняется улуч-

шением гранулометрического состава смеси и более плотной упаковкой частиц цементной матрицы.

В противоположность этому увеличение содержания базальтовых и полипропиленовых фибр (X_4

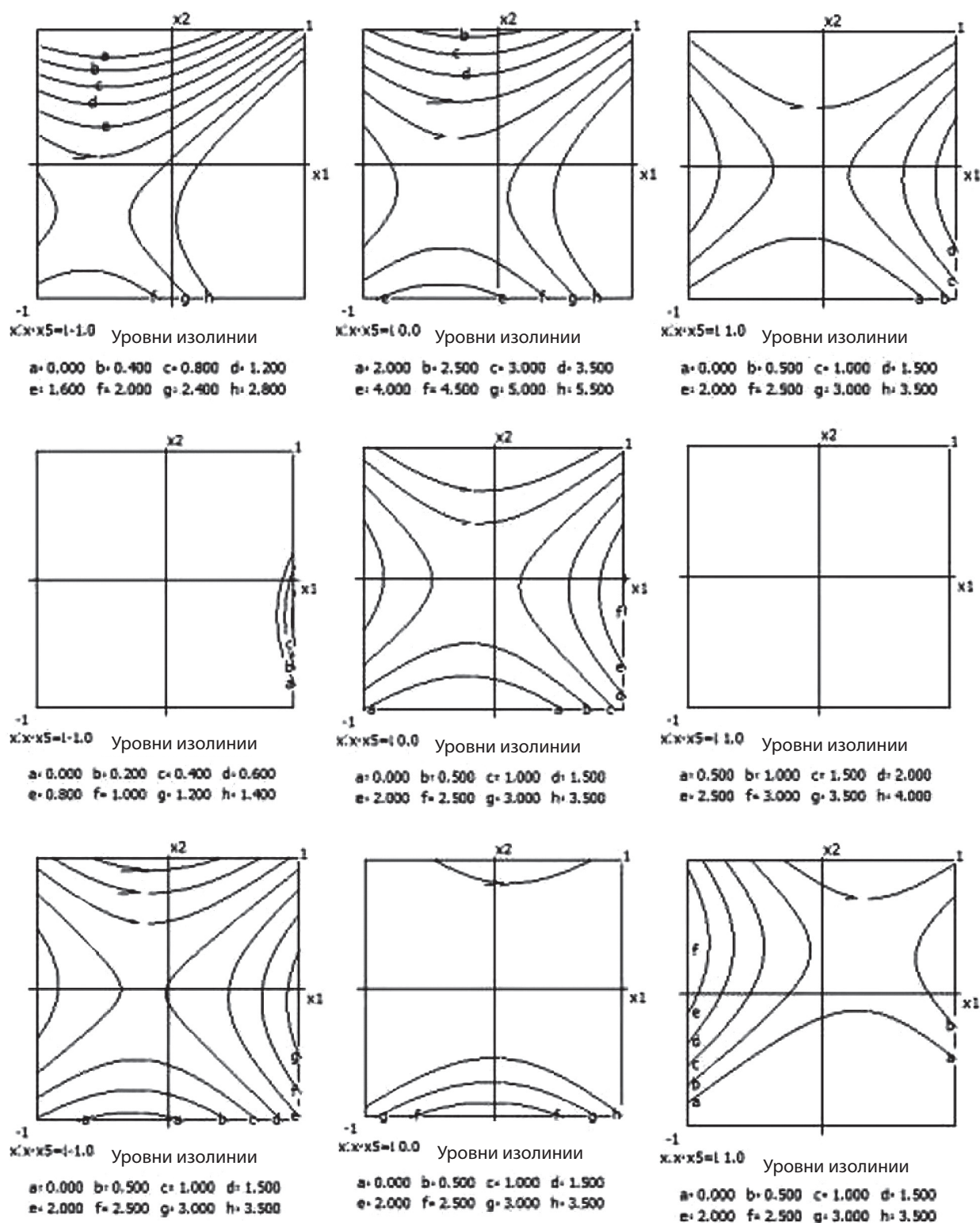


Рис. 4. Водопоглощение композиционного материала $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ ($x_4 = -1$, без Фибры баз. = 0%)

и X_5) приводит к снижению плотности. Данный эффект обусловлен тем, что введение волокон ухудшает уплотнение смеси и способствует образованию дополнительной пористости вследствие формиро-

вания межфазных зон «волокно – цементная матрица».

Квадратичные коэффициенты при факторах X_4^2 и X_5^2 имеют отрицательные значения, что указыва-

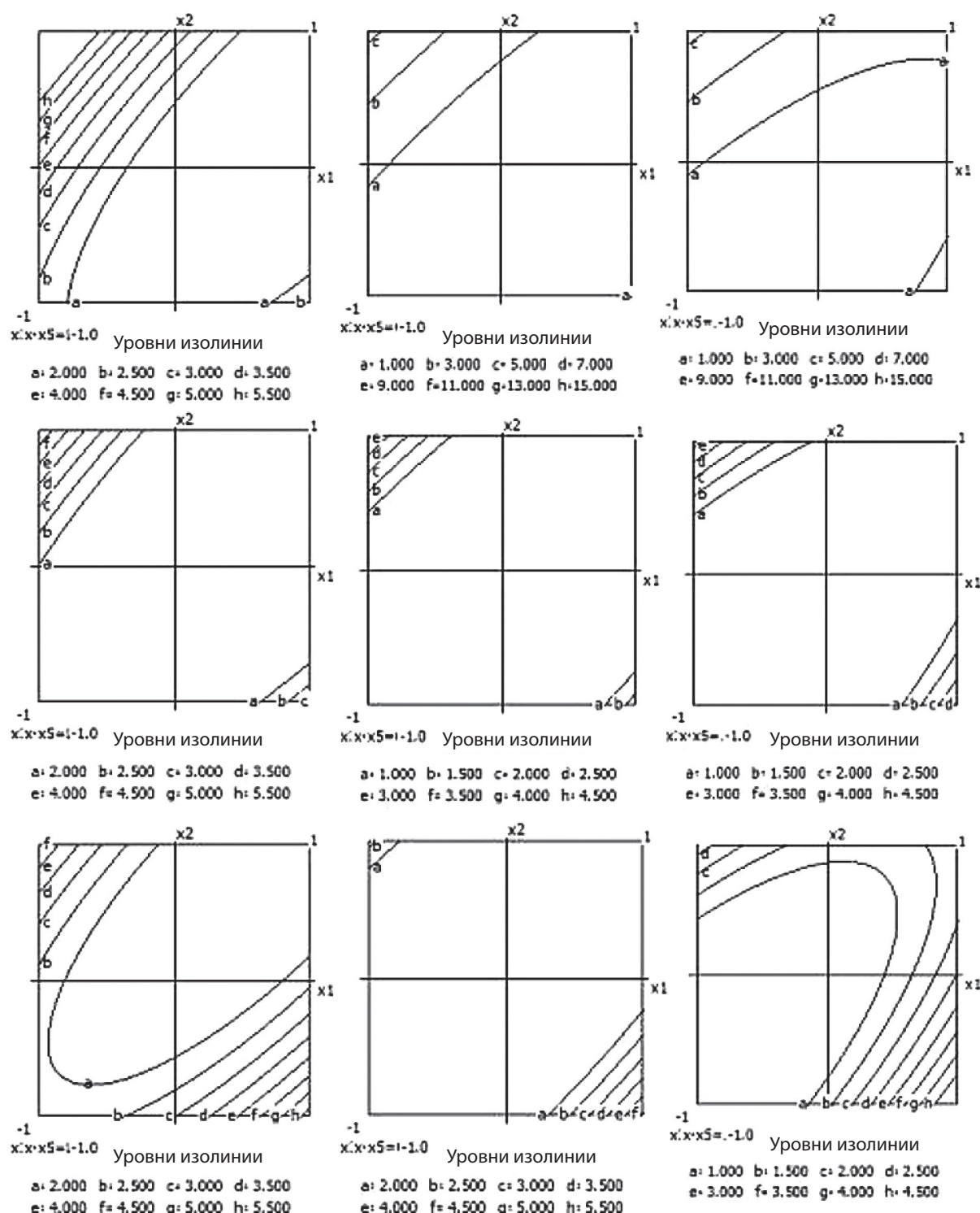


Рис. 5. Прочность на сжатие композиционного материала $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

ет на наличие оптимального интервала содержания фибр. При превышении определенной концентрации волокон происходит ухудшение структуры материала и снижение плотности вследствие образования дефектов и локальных пустот.

Существенное влияние оказывают и межфакторные взаимодействия. В частности, отрицательные коэффициенты взаимодействий X_3X_4 и X_3X_5 свидетельствуют о том, что при одновременном увеличении содержания мраморной пыли и фибр наблюда-

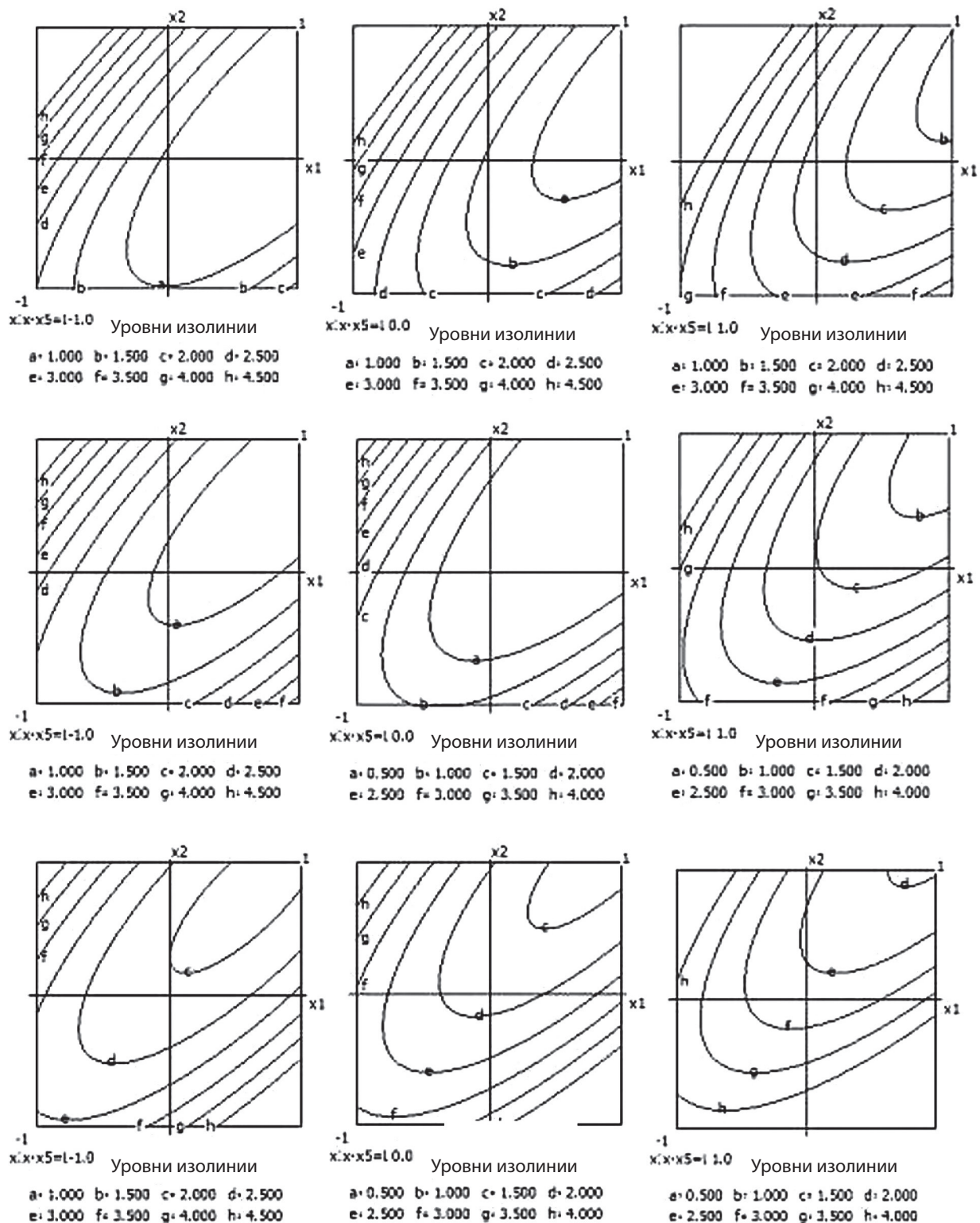


Рис. 6. Прочность на сжатие композиционного материала $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%)

ется снижение плотности материала. Это связано с тем, что избыток мелкодисперсного наполнителя в присутствии волокон ухудшает условия уплотнения и формирует более развитую пористую структуру.

Таким образом, полученная модель позволяет количественно оценить влияние рецептурных факторов на плотность композиционного материала и определить оптимальные области состава.

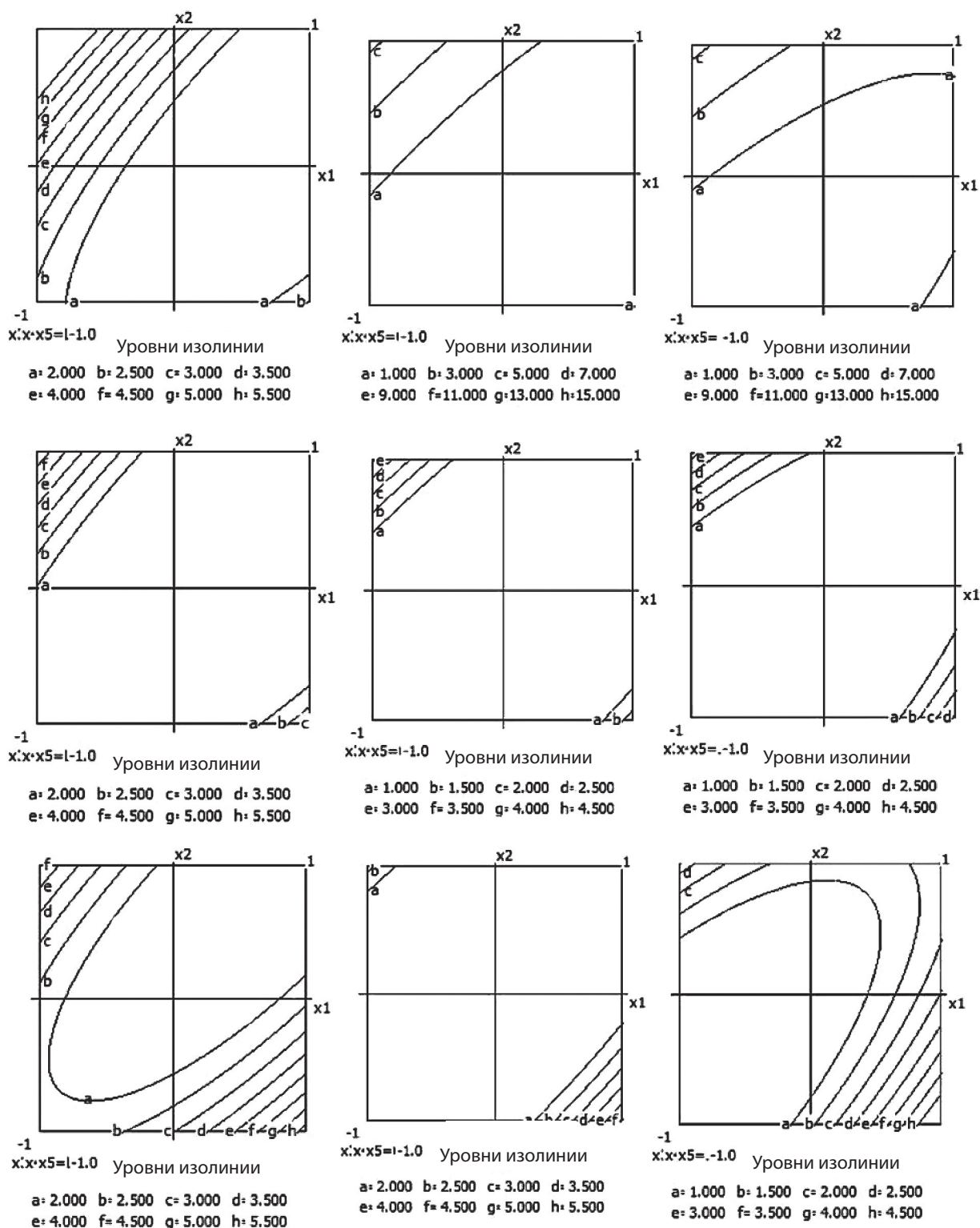


Рис. 7. Прочность на изгиб композиционного материала $Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без фибры полипропиленовой = 0%)

Наличие фибр (и особенно их увеличение) приводит к уменьшению плотности материала. Это объясняется увеличением внутренней пористости при введении волокон (возникновение локальных пу-

стот, ухудшение уплотнения при вибрации/укладке), а также тем, что фибры сами по себе занимают объем и формируют нерегулярную структуру матрицы.

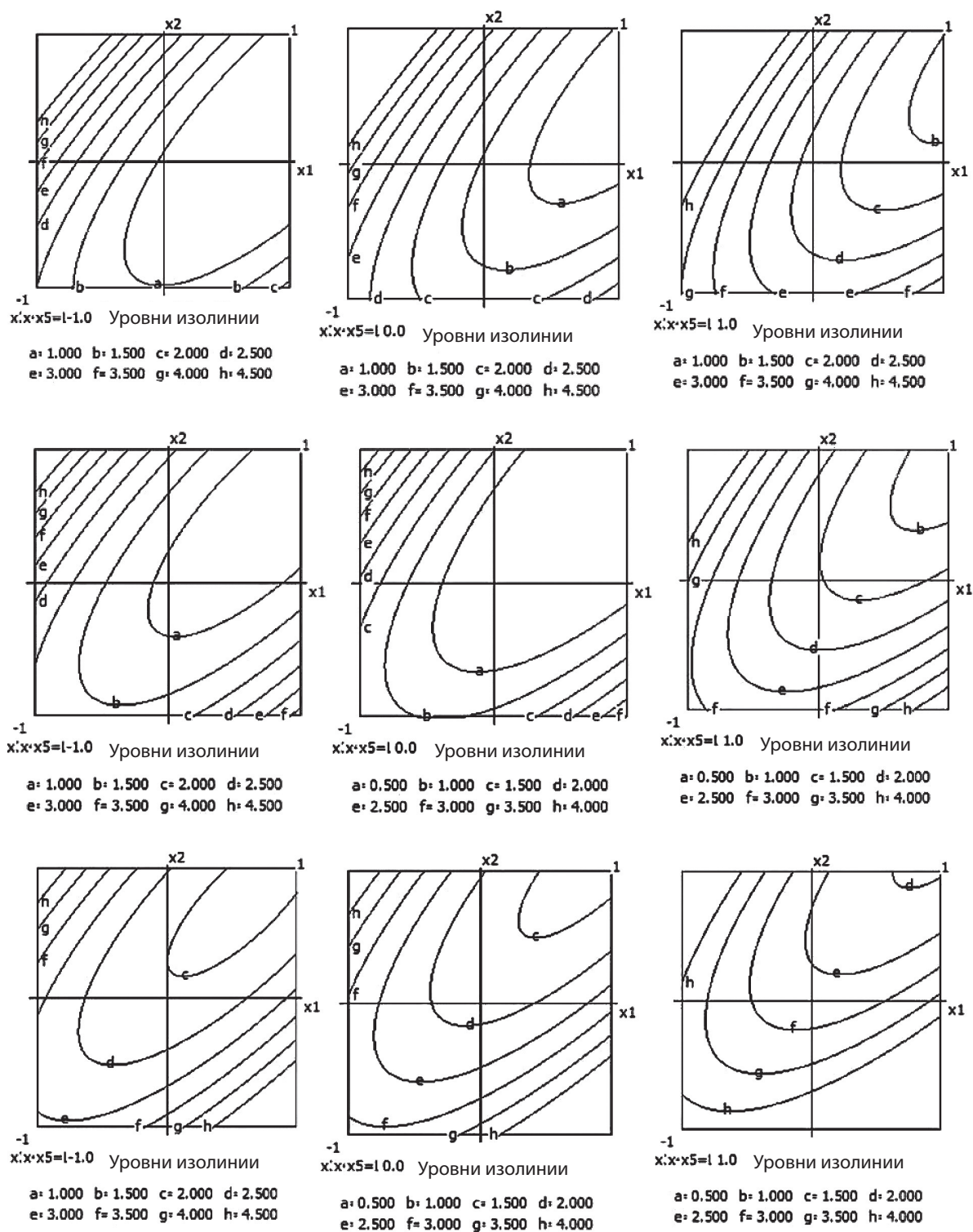


Рис. 8. Прочность на изгиб композиционного материала $Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз 0%)

Квадратичные отрицательные члены (x_4^2, x_5^2) указывают на нелинейный эффект: при малых дозах влияние на плотность невелико, при больших — эффект резко усиливается (пороговое ухудшение уплотнения).

Анализ коэффициентов показывает:

- Плотность существенно повышает фактор X_3 — мраморная пыль.
- Наибольшее снижение плотности дают фибры X_4 и X_5 (отрицательные коэффициенты).

- Сильные взаимодействия X_3X_4 , X_3X_5 , X_4X_5 указывают на то, что волокна уменьшают уплотнение при избытке мелкого дисперсного компонента. Основные закономерности:
- Увеличение мраморной пыли X_3 снижает водопоглощение (отрицательные коэффициенты).
- Волокна, наоборот, повышают Y_2 (коэффициенты X_4 , $X_5 > 0$).
- Влияние взаимодействий X_1X_3 , X_1X_4 , X_2X_5 указывает на комбинированные механизмы порообразования.

Волокна увеличивают водопоглощение: механизм – волокна создают дополнительные капиллярные пути и локальные дефекты межфазной зоны «волокно–матрица», что повышает проницаемость.

Положительные взаимодействия (особенно x_3x_4) означают, что сочетание мелкодисперсной пыли и волокон иногда усиливает водоудерживающие каналы (возможно, из-за формирования тонкопористой структуры вокруг волокон).

$$Y_2 \text{ (водопоглощение, \%)} = 11,369 + 0,611 x_1 + 0,394 x_2 - 0,344 x_3 + 0,933 x_4 + 0,772 x_5 - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 0,297 x_4^2 + 1,947 x_5^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 - 1,137 x_1 x_4 + 1,10 x_1 x_5 - 0,612 x_2 x_3 + 0,325 x_2 x_4 + 1,387 x_2 x_5 + 3,487 x_3 x_4 + 1,65 x_3 x_5 + 2,862 x_4 x_5. \quad (4)$$

$Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

Формула 4-х факторной модели $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$.

$$Y_2 \text{ (водопоглощение, \%)} = 12,544 + 0,489 x_1 - 0,993 x_2 - 1,306 x_3 - 1,929 x_4 - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 0,297 x_4^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 - 1,137 x_1 x_4 + -0,612 x_2 x_3 + 0,325 x_2 x_4 + 3,487 x_3 x_4. \quad (5)$$

Формула 4-х факторной модели $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%)

$$Y_2 \text{ (водопоглощение, \%)} = 10,733 + 1,748 x_1 + 0,069 x_2 - 3,143 x_3 + -2,09 x_5 - 1,103 x_1^2 + 1,147 x_2^2 + 1,297 x_3^2 + 1,947 x_5^2 + 0,764 x_1 x_2 - 1,225 x_1 x_3 + 1,10 x_1 x_5 - 0,612 x_2 x_3 + 1,387 x_2 x_5 + 1,65 x_3 x_5. \quad (6)$$

Регрессионная модель водопоглощения (уравнение 3) показывает, что на данное свойство значительное влияние оказывает содержание мраморной пыли и армирующих волокон.

Отрицательный коэффициент при факторе X_3 указывает на то, что увеличение содержания мраморной пыли приводит к снижению водопоглощения.

Это объясняется уплотнением структуры материала и уменьшением объема открытых капиллярных пор.

В то же время увеличение содержания фибр (X_4 и X_5) сопровождается ростом водопоглощения. Причиной этого является формирование дополнительных капиллярных каналов и межфазных дефектов в зоне контакта «волокно – цементная матрица», что повышает проницаемость материала для воды.

Значительные коэффициенты при взаимодействиях X_3X_4 и X_3X_5 свидетельствуют о том, что влияние волокон на водопоглощение зависит от содержания мелкодисперсного наполнителя. При высоком содержании мраморной пыли формируется тонкопористая структура вокруг волокон, что может усиливать капиллярный перенос влаги.

Таким образом, минимизация водопоглощения достигается при повышенном содержании мраморной пыли и ограниченном количестве армирующих волокон.

$$Y_3 \text{ (Прочность на сжатие, МПа)} = 3,92 + 0,981 x_1 - 0,557 x_2 + 0,497 x_3 + 0,475 x_4 - 0,621 x_5 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - 2,979 x_4^2 - 2,975 x_5^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 + 0,63 x_1 x_4 - 0,597 x_1 x_5 - 0,64 x_2 x_3 - 0,409 x_2 x_4 + 0,591 x_2 x_5 + 0,412 x_3 x_4 - 0,429 x_3 x_5 - 1,048 x_4 x_5.$$

5-ти факторная модель Y_3 преобразована в 4-х факторную $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при условии $X_5 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

$$Y_3 = 1,566 + 1,578 x_1 - 1,148 x_2 + 0,925 x_3 + 1,523 x_4 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - 2,979 x_4^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 + 0,63 x_1 x_4 - 0,64 x_2 x_3 - 0,409 x_2 x_4 + 0,415 x_3 x_4. \quad (7)$$

Полученная регрессионная модель прочности на сжатие (уравнение 6) показывает сложный характер влияния рецептурных факторов на прочностные характеристики композиционного материала.

Наибольшее положительное влияние на прочность оказывает мраморная пыль (X_3), что подтверждается значительным положительным квадратичным коэффициентом. Мелкодисперсные частицы мрамора выполняют роль микрозаполнителя, способствуя уплотнению цементной матрицы и формированию более прочной структуры.

Базальтовые фибры (X_4) оказывают положительное влияние на прочность на сжатие. Это объясняется их армирующим эффектом: волокна препятствуют распространению микротрещин и обеспечивают перераспределение напряжений в структуре композита.

Полипропиленовые фибры (X_5), напротив, оказывают менее благоприятное влияние на прочность. Вероятной причиной является относительно слабая адгезия полипропиленовых волокон к минеральной матрице, что может приводить к образованию локальных дефектов и снижению несущей способности материала.

Отрицательные квадратичные коэффициенты при X_4^2 и X_5^2 свидетельствуют о том, что чрезмерное содержание волокон приводит к снижению прочности. Это подтверждает существование оптимального интервала армирования.

Формула 4-х факторной модели $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%).

$$Y_3 = 0,466 + 0,351 x_1 - 0,148 x_2 + 0,081 x_3 + 0,427 x_5 + 1,276 x_1^2 - 1,704 x_2^2 + 3,877 x_3^2 - 2,975 x_5^2 - 0,526 x_1 x_2 + 0,461 x_1 x_3 - 0,591 x_1 x_5 - 0,64 x_2 x_3 + 0,591 x_2 x_5 - 0,429 x_3 x_5.$$

$$Y_4 \text{ (Прочность на изгиб, МПа)} = -0,862 - 0,251 x_1 + 0,205 x_2 - 0,199 x_3 + 0,119 x_4 = 0,51 x_5 + 1,061 x_1^2 + 1,072 x_2^2 + 0,99 x_3^2 + 0,99 x_4^2 + 1,013 x_5^2 - 1,698 x_1 x_2 - 0,809 x_1 x_3 + 0,602 x_1 x_4 - 0,065 x_1 x_5 + 0,786 x_2 x_3 - 0,264 x_2 x_4 - 0,234 x_2 x_5 + 0,641 x_3 x_4 - 1,027 x_3 x_5 - 0,049 x_4 x_5.$$

5-ти факторная модель Y_4 преобразована в 4-х факторную $Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при условии $X_4 = -1$ ($x_5 = -1$, без Фибры полипропиленовой = 0%)

$$Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -0,359 - 0,186 x_1 + 0,439 x_2 + 0,828 x_3 + 0,168 x_4 + 1,061 x_1^2 + 1,072 x_2^2 + 0,99 x_3^2 + 0,99 x_4^2 - 1,698 x_1 x_2 - 0,809 x_1 x_3 + 0,602 x_1 x_4 + 0,786 x_2 x_3 - 0,264 x_2 x_4 + 0,641 x_3 x_4.$$

Формула 4-х факторной модели $Y_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_5)$ при $X_4 = -1$ (фибра баз. 0%)

$$Y_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5) = 0,009 - 0,853 x_1 + 0,469 x_2 - 0,84 x_3 + 1,061 x_1^2 + 1,072 x_2^2 + 0,99 x_3^2 + 1,013 x_5^2 - 1,698 x_1 x_2 - 0,809 x_1 x_3 - 0,065 x_1 x_5 + 0,786 x_2 x_3 - 0,234 x_2 x_5 - 1,027 x_3 x_5.$$

Анализ модели прочности на изгиб показывает, что данное свойство в значительной степени определяется составом минерального наполнителя и типом армирующих волокон.

Положительное влияние на прочность при изгибе оказывают мраморный порошок (X_2) и мраморная пыль (X_3), которые способствуют формированию более плотной и однородной структуры цементной матрицы.

Наиболее выраженное положительное влияние среди армирующих компонентов оказывает базальтовая фибра (X_4). Высокая прочность и модуль упругости базальтовых волокон обеспечивают эффективное восприятие растягивающих напряжений, возникающих при изгибе, и препятствуют развитию трещин.

Полипропиленовые фибры оказывают менее выраженное влияние на изгибную прочность. Их основная функция заключается в повышении трещиностойкости и ограничении раскрытия микротрещин, однако их вклад в повышение предельной прочности материала сравнительно невелик.

Оптимальная область рецептурных параметров соответствует следующим значениям факторов: мраморная крошка – $25 \div 30\%$; мраморный порошок – $10 \div 15\%$; мраморная пыль – около 12% ; базальтовая фибра – $2 \div 4\%$; полипропиленовая фибра \times не более $1 \div 2\%$.

В указанной области обеспечивается наиболее благоприятное сочетание плотности, прочности и водопоглощения композиционного материала.

Для требующих низкого водопоглощения составы с фибрами нуждаются в дополнительной оптимизации: уменьшить X_4/X_5 , увеличить долю пыли X_3 (для лучшей упаковки), использовать суперпластификатор или гидрофобизирующую добавку.

Полипропиленовые фибры увеличивают водопоглощение почти так же, как базальтовые — поэтому их применение следует ограничивать, если целью является минимизация влажности.

В полной модели коэффициент при x_4 положительный (+0,475), при x_5 — отрицательный (–0,621). В 4-факторном сечении при $X_5 = -1$ базальтовая фибра дает значительное положительное влияние (в сечении X_4 коэффициент +1,523).

Построенные двумерные номограммы (рис. 1–8) наглядно отображают влияние исследуемых факторов на свойства композиционного материала и позволяют определить оптимальные области рецептурных параметров.

Анализ номограмм показывает, что максимальные значения прочности и минимальные значения водопоглощения достигаются при повышенном содержании мраморной пыли и умеренном количестве базальтовых фибр.

Квадратичные взаимодействия: сильный положительный квадратичный член x_3^2 (мраморная пыль) и отрицательный квадратичный член x_4^2 (в 5-факторной модели было $-2,979 \cdot x_4^2$ в одной формуле) показывают, что польза от фибр имеет максимум при средней дозе.

Выявлено: мраморная пыль X_3 оказывает наибольшее положительное влияние на прочность (крупный положительный квадратичный коэффициент); базальтовая фибра X_4 увеличивает прочность,

а полипропиленовая X_5 — снижает (в полной модели); наибольшее ослабление идет через взаимодействие X_4X_5 → конкуренция армирующих фаз.

Анализ регрессионных моделей показывает, что базальтовые фибры (X_4) и полипропиленовые фибры (X_5) по-разному влияют на ключевые свойства фибробетона. Базальтовая фибра усиливает прочностные характеристики (особенно прочность на сжатие и изгиб) при умеренных дозах, но снижает плотность и при передозировке повышает водопоглощение. Полипропиленовая фибра чаще оказывает отрицательное влияние на плотность и прочность на сжатие и увеличивает водопоглощение; ее целесообразно применять в малых дозах или вовсе исключать в задачах, где важна плотность и прочность.

Базальтовая фибра улучшает прочность на сжатие за счет армирующего эффекта — она препятствует формированию и раскрытию трещин, передает и перераспределяет напряжения в матрице.

Полипропиленовая фибра в наших данных уменьшает прочность на сжатие; вероятные причины — слабая адгезия ПП к минералу, матрице, образование пустот вокруг волокон или ухудшение технологичности укладки (плохое уплотнение).

Для увеличения прочности на сжатие предпочтительна базальтовая фибра в умеренных дозах ($X_4 = 2 \div 4\%$).

Избегать или минимизировать полипропиленовую фибру необходимо, если приоритет — прочность на сжатие; альтернативно улучшать адгезию (обработка поверхности волокон, добавки -сурфактанты).

Модель Y4 показывает положительный вклад X_4 (приблизительно +0,119...+0,168 в разных сечениях) и нулевой/слабый эффект X_5 (в некоторых вариантах коэффициент около +0,51· x_5 , но общая картина — зависимость сложная с сильными квадратичными и межфакторными членами).

Закономерности:

- прочность возрастает при увеличении X_2 и X_3 ;
- фибры по-разному влияют: базальтовые X_4 повышают изгиб, ПП-фибра снижает в вариантах без X_4 ;
- значимые взаимодействия X_1X_2 , X_2X_3 , X_3X_4 определяют формирование каркаса.

Базальтовая фибра дает прирост прочности на изгиб за счет упрочнения межфазной зоны и перераспределения растягивающих напряжений.

Полипропиленовая фибра умеренно влияет на изгибовую прочность (в ряде моделей положительно, в ряде — нейтрально), т.к. ПП хорошо работает на контролируемое трещинообразование (улучшает трещиностойкость), но не придает большого упрочнения на сжатие или изгиб при слабой адгезии.

Для улучшения изгибовой прочности необходимо применять базальтовые фибры; оптимум — средние дозы ($\approx 2\text{--}3\%$).

Если задача — повысить остаточную трещиностойкость при небольшом снижении прочности, можно использовать малые дозы ПП вместе с базальтовыми фибрами, однако это требует дополнительной валидации.

Сильные попарные взаимодействия, выявленные в моделях (в частности $x_3 \cdot x_4$, $x_3 \cdot x_5$, $x_4 \cdot x_5$), свидетельствуют о том, что эффект фибр зависит от состава минерального наполнителя. Например, при высоком содержании мраморной пыли усиление от базальта может быть меньше или, наоборот, зависеть от уплотнения матрицы.

Квадратичные члены x_4^2 и x_5^2 говорят о существовании оптимального интервала доз фибр — «чрезмерное» армирование ухудшает свойства.

Базальтовая фибра (X_4):

- Рекомендуемая рабочая доза: $\approx 2\text{--}3\%$ (в пределах нашего ряда: $2\% =$ уровень 0; $4\% = +1$);
- Применять для повышения прочности на сжатие и изгиб; при этом контролировать уплотнение смеси;
- При дозах $>4\%$ необходима корректировка методики уплотнения (вибрация, суперпластификаторы) и проверка на увеличение пористости.

Полипропиленовая фибра (X_5):

- Приоритеты: если цель — снижение трещинообразования и повышение ударной/деформационной прочности, можно использовать малые дозы $0,5\text{--}2\%$; если цель — плотность и компрессия, лучше исключить (0%);
- При использовании ПП-фибры рекомендуется улучшать адгезию (модификация поверхности волокон, применение связующих добавок).

Комбинация армирующих фибр:

- Комбинированное армирование (базальт + ПП) возможно, но требует оптимизации: часто оптимальная схема — основная нагрузка на базальтовые фибры ($2\text{--}3\%$), ПП — в малой доле ($\leq 1\text{--}2\%$) для контроля трещинообразования;
- Оптимальным считается состав, обеспечивающий минимальное водопоглощение; максимальную прочность на сжатие (Y_3) и изгиб (Y_4), рациональную плотность, при этом соблюдается технологичность смеси.

По графическим областям и анализу производных максимизации был установлен оптимальный диапазон компонентов:

- X_1 (мраморная крошка): $0 \dots +1$ ($25\text{--}30\%$);
- X_2 (мраморный порошок): $0 \dots +1$ ($10\text{--}15\%$);
- X_3 (мраморная пыль): $+1$ (12%) — основной упрочняющий компонент;
- X_4 (фибры базальтовые): $0 \dots +1$ ($2\text{--}4\%$);
- X_5 (ПП-фибра): -1 (0%) или максимум $1\text{--}2\%$.

Проведенный 5-факторный эксперимент типа $Na5$ позволил построить адекватную квадратич-

ную математическую модель плотности композиционного материала, учитывающую линейные, квадратичные и попарные взаимодействия факторов. Анализ значимости коэффициентов показал, что наибольшее влияние оказывают содержание мраморной пыли, базальтовой и полипропиленовой фибры, а также взаимодействия между ними. На основе модели сформированы 4-факторные сечения рецептурной области при исключении отдельных видов фибры, что позволило определить оптимальные области составов для получения минимального водопоглощения и максимальной плотности.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Базальтовые фибры – эффективный инструмент для повышения прочностных характеристик

фибробетона при умеренных дозах ($\approx 2\text{--}3\%$), но ухудшают плотность и повышают водопоглощение при передозировке.

2. Полипропиленовые фибры в наших моделях чаще ухудшают плотность и прочность на сжатие и повышают водопоглощение; их применение целесообразно ограничивать малыми дозами и лишь при необходимости повышения трещиностойкости.

3. Существуют четкие нелинейные зависимости и взаимодействия с наполнителями (в частности, с мраморной пылью X_3), поэтому оптимизация состава должна выполняться многокритериально и с последующей экспериментальной валидацией.

4. Наилучший комплекс свойств достигается при использовании мраморной пыли и базальтовой фибры. Полипропиленовая фибра в большинстве случаев ухудшает свойства и должна применяться ограниченно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Ормонбеков Т.О. Техника и технология производства базальтовых волокон. Бишкек: Илим; 2005;152.
- Абдыкалыков А., Айдаралиев Ж.К., Абдыкалык кызы Ж., Кудуев А.Ж., Рашид кызы Б. Пригодность базальтового сырья Кыргызской Республики для производства супертонких и непрерывных волокон. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(6):574–582. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-574-582> EDN: SNRTSV
- Пашенко А.А., Сербин В.П., Пасловская А.П. Армирование неорганических веществ минеральными волокнами. М.: Стройиздат; 1988;201.
- Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М. Выбор видов волокон для дисперсного армирования изделий из центрифугированного бетона. *Науковедение*. 2017;9(4):1–10. EDN: ZIGGJP
- Жуков А.Д., Рудницкая В.А., Смирнова Т.В. Армирующие волокна в технологии бетонов. *Вестник МГСУ*. 2012;4:160–164. EDN: PAVGRZ
- Гурьева В.А., Белова Т.К. Технология приготовления цементных растворов, дисперсно армированных модифицированной микрофиброй. *Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура*. 2016;16(1):41–45. <https://doi.org/10.14529/build160106> EDN: VNXQSN
- Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012;4:58–61. EDN: PKRWCD
- Кнотько А.Б., Меледин А.А., Судьин В.В., Гаршев А.В., Пуляев В.И. Модификация поверхностного слоя базальтового волокна для увеличения коррозионной стойкости в фиброцементных композитах. *Строительные материалы*. 2010;9:89–93. EDN: NBIJAD
- Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Савгир Н.Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;2:63–66. EDN: PVMBSR
- Павлова И.П., Беломесова К.Ю. Стойкость базальтового фиброволокна в щелочной среде гидратирующих цементных систем. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F*. 2022;8:81–88. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-31-8-81-88> EDN: HLUAPR
- Кондрашов Г.М., Гольдштейн Б.М. Базальтофибробетон – технология будущего. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10*. 2012;7:91–93. EDN: RCPEVP
- Клюев А.В., Клюев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон, армированный полипропиленовым волокном. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014;4:67–72. EDN: SMLETZ
- Осама аль Хело, Осипчик В.С., Кравченко Т.П. Получение композиционных материалов на основе наполненного полипропилена с улучшенными эксплуатационными характеристиками. *Успехи в химии и химической технологии*. 2007;21(5):66–70.
- Клюев С.В., Авилова Е.Н. Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;1:37–40. EDN: OFMZPK
- Окольников Г.Э., Йочич М., Курлин М. Перспективы применения полидисперсно-армированных фибробетонов. *Системные технологии*. 2021;38:86–88. EDN: MEMCYA
- Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Евтушенко Е.И. Исследование химического взаимодействия стекловолокна с продуктами гидратации цемента. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020;12:119–125. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-119-125> EDN: QYDGYC
- Леонович И.А., Леонович А.А. Механизм разрушения фибробетонов на заполнителе из микросфер зол-уноса. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2009;4:149–158. https://doi.org/10.53078/20778481_2009_4_149 EDN: OITKZDZ
- Нахаев М.Р. Межфазные явления при увлажнении электростатического фибробетона. *Вестник ДГТУ*. 2022;49(1):140–148. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-140-148> EDN: DSNUEM
- Мухаметрахимов Р.Х., Галаудинов А.Р., Гарафиев А.М. Структура и свойства волокнистых композитов на основе модифицированных минеральных вяжущих. *Известия КГАСУ*. 2020;4:62–71. EDN: JKWSRU
- Вишневская Я.Ю., Трунов П.В., Калатози В.В., Бондаренко Д.О. Перспективы повышения эффективности фибробетонов за счет применения композиционных вяжущих. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;3:35–37. EDN: PZLHCS

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

21. Леонович И.А. Прочностные свойства фибробетонов с заполнителем из микросфер при ударном нагружении. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2008;2(19):129–136. https://doi.org/10.53078/20778481_2008_2_129 EDN: OKFNAX
22. Овчаренко Г.И., Песоцкий А.В., Авакумов Е.Г. Влияние минеральных микродобавок на прочность цементного камня. *Ползуновский вестник*. 2014;1:130–134. EDN: SQTNAJ
23. Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Рашид кызы Б., Пугачева И.Н., Суйунбек уулу А. Оптимизация состава и свойств керамического композита на основе барита и бентонита. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):715–732. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-715-732> EDN: SQPEGQ
24. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок. *Строительные материалы*. 2016;9:68–72. EDN: WMSCBJ
25. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Хулелидзе К.К., Цидаев Б.С. Влияние активации минеральных добавок к вяжущему на прочность бетонных смесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;6:66–78. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-66-78> EDN: ZXYNXN
26. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальтово-волоконистого высокопрочного бетона. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018;14(5):396–403. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403> EDN: YQJVAL
27. Афанасьев Е.Н., Жариков И.В., Тарасов С.Н., Солдатова Н.И., Муфтиева Л.Р., Пономарев М.М. Способ производства труб из бетонных смесей: пат. RU 2200657. Оpubл. 20.03.2002.
28. Ерофеев В.Т., Кретов Д.А. Обзор патентов по изготовлению изделий под давлением из высокопрочного фибробетона. *Эксперт: теория и практика*. 2022;2(17):32–35. https://doi.org/10.51608/26867818_2022_2_32 EDN: MWPZDB
29. Ибе Е.Е., Шугурова А.В. Перспективы применения фибробетона при строительстве гидротехнических сооружений. *Науковедение*. 2017;9(1):1–8. EDN: YMXPFFZ
30. Ширинзаде И.Н., Ахмедов Н.М. Пути повышения эффективности фибробетона. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;3(57):107–110. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.57.125> EDN: YGTZOV
31. Левкович Т.И., Токар Н.И., Мевлидинов З.А., Ласман И.А., Федоров И.С., Ласман В.С. Разработка и исследование свойств составов цементнофибробетонов для дорожного строительства. *Вестник Евразийской науки*. 2021;1:1–10. EDN: WRWAFС
32. Алексеев К.Н., Курилко А.С. Разработка мелкозернистого ударопрочного фибробетона для применения в условиях рудников криолитозоны. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;12-1:15–28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_1_0_15 EDN: ZLWNIO
33. Способ формования фибробетонных изделий: пат. SU 1425091. Оpubл. 23.09.1988.
34. Бондарев Ю.Л., Попов В.А., Бондраева И.Л. Способ приготовления фибробетонных смесей: пат. RU 2194614. Оpubл. 20.12.2002. EDN: HWLLIR
35. Рябов Г.Г., Стенякин А.Н., Хмелевский М.В. Композиционная сырьевая смесь для изготовления фибробетона: пат. RU 2770375. Оpubл. 15.04.2022.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи использовали ИИ только для проверки грамматики и улучшения содержания текста.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдыкалыков Акымбек – доктор технических наук, профессор, советник ректора, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, Кыргызская Республика, abdykalykov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7260-8738>

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, Кыргызская Республика, janlem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1100-3237>

Абдыкалык кызы Жыпаргул – старший преподаватель кафедры экономики и налогов, Институт физики имени Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызская Республика, gold_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4958-1240>

Сопубеков Нематилла Абдилахович – кандидат технических наук, доцент, Ошский технологический университет, 723503, Ош, ул. Исанова 81, Кыргызская Республика, nematsopubekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7309-0292>

Суйунбек уулу Акжол – аспирант лабораторий базальтовых волокон и композиционных материалов института Физики им. Ж. Жеенбаева, Национальная академия наук, 720071, Бишкек, проспект Чуй, 265а, Кыргызская Республика, akzhol.toktomushov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9477-4944>

ВКЛАД АВТОРОВ

Абдыкалыков Акымбек – научное руководство, концепция исследования.

Айдаралиев Жанболот Качкынбаевич – концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Абдыкалык кызы Жыпаргул – написание текста и обработка полученных данных.

Сопубеков Нематилла Абдилахович – выполнение экспериментальной части исследования.

Суйунбек уулу Акжол – сбор материала по литературным источникам.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 04.04.2026; принята к публикации 09.04.2026.