

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 5 / 2023, Vol. 15, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/46SAVN523.pdf>

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Соколов, П. Э. Повышение эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке с помощью комплексной добавки / П. Э. Соколов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/46SAVN523.pdf>

**For citation:**

Sokolov P.E. Increasing of efficiency of fine fiber concrete on fine sand by means of a complex additive. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(5): 46SAVN523. Available at: <https://esj.today/PDF/46SAVN523.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 691.32

**Соколов Петр Эдуардович**

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия  
Доцент кафедры «Строительные материалы и специальные технологии»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [pr7391@yandex.ru](mailto:pr7391@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3960-5010>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=439730](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439730)

## Повышение эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке с помощью комплексной добавки

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной теме — расширению сырьевой базы мелкозернистых бетонов за счет использования тонких песков. Применение в мелкозернистых бетонах тонких песков связано с рядом проблем, таких как увеличение расхода вяжущего вещества, изменение реологических характеристик мелкозернистых смесей, снижение прочности мелкозернистых бетонов и их эффективности как материала. Для решения этих проблем была использована комплексная органо-минеральная добавка, состоящая из тонкодисперсного наполнителя, суперпластификатора, базальтовой фибры и добавки «Unticogprot». Для оценки влияния комплексной добавки на эффективность мелкозернистого бетона были изготовлены контрольные образцы и образцы различных составов в соответствии с выбранным планом полного четырехфакторного эксперимента. Для получения исходных данных необходимых для дальнейших расчетов показателей эффективности мелкозернистых бетонов на тонком песке, с комплексной добавкой были применены стандартные методики определения предела прочности при сжатии и средней плотности. Автором представлены рассчитанные показатели эффективности составов мелкозернистых фибробетонов, полученные на основании результатов проведенных исследований. В качестве показателей эффективности составов мелкозернистого бетона были использованы — коэффициент конструктивного качества и удельный расход цемента на единицу прочности бетона. В статье приведены описательные статистики полученных данных и проведен их анализ. Получены математические модели для функций отклика — коэффициента конструктивного качества и удельного расхода цемента на единицу прочности бетона. Проведена оценка их достоверности и адекватности. Установлены оптимальные расходы компонентов комплексной органо-минеральной добавки, которые позволяют получить мелкозернистый фибробетон на

тонком песке с более высокими показателями как коэффициента конструктивного качества, так и удельного расхода цемента на единицу прочности.

**Ключевые слова:** мелкозернистый фибробетон; тонкий песок; сырьевая база; комплексная добавка; эффективность; критерий эффективности; планирование эксперимента; описательные статистики; анализ; математическая модель

Производство строительных материалов, в т. ч. различных видов бетона требует огромного количества сырьевых материалов. Природные ресурсы для строительной отрасли с течением времени исчерпываются. Наряду с этим оставшиеся запасы разрабатываемых, а иногда и перспективных для разработки месторождений сырьевых материалов не всегда отвечают требованиям, предъявляемым к ним со стороны производителей строительных материалов.

Одним из возможных направлений расширения сырьевой базы мелкозернистых бетонов является использованием тонких, а подчас некондиционных песков. Однако использование таких песков связано с рядом технологических проблем, решить которые можно за счет использования комплексных органо-минеральных добавок. Наряду с этим актуальным является вопрос об эффективности разрабатываемых материалов.

Снижение материалоемкости и уменьшение массы строительных конструкций без потери их несущей способности и других эксплуатационных свойств является одним из основных факторов повышения эффективности строительства. Одним из способов достижения этих целей является создание и применение бетонов с повышенными показателями конструктивного качества, т. е. с большим по сравнению с традиционными бетонами относительными показателями прочности на единицу средней плотности [1].

В 60<sup>е</sup> — 70<sup>е</sup> годы прошлого столетия мелкозернистый бетон нашел широкое применение в строительстве при изготовлении самых разнообразных изделий и конструкций [2; 3].

Наряду с положительными качествами мелкозернистые бетонные смеси, и бетоны имеют и отрицательные, которые, как правило, компенсируют применением химических или комплексных органо-минеральных добавок [4].

С каждым годом при производстве различных видов бетонов, в т. ч. мелкозернистых расширяется применение различных видов химических добавок и наполнителей. Их применение позволяет регулировать свойства, качество и технологические показатели получаемых композиционных материалов. Использование химических добавок и минеральных наполнителей способно компенсировать недостатки исходного сырья, применять некондиционное сырье либо отходы промышленности в качестве сырьевых материалов.

В настоящее время в мелкозернистых бетонах применяется весь спектр химических добавок [5; 6], тонкодисперсных наполнителей [7; 8], волокон (фибр) различного вида [9; 10], а также комплексных добавок различного состава [11; 12] и отходов различных производств [13].

При исследовании состава и свойств мелкозернистых бетонов и материалов на их основе применяются математические методы и методы планирования эксперимента [14]. Проводится поиск путей позволяющих оценить эффективность получаемых материалов на основе мелкозернистых бетонов по сравнению с традиционными или контрольными [15].

Для оценки эффективности полученной фиброцементной композиции выбраны два наиболее распространенных критерия:

1. Коэффициент конструктивного качества (ККК), который представляет собой отношение [16]:

$$\frac{f_{lck}}{\rho_{tr}} = KKK, \quad (1)$$

где  $f_{lck}$  — прочность при сжатии, Н/мм<sup>2</sup>;  $\rho_{tr}$  — плотность бетона в сухом состоянии, кг/дм<sup>3</sup>.

Причем чем выше этот показатель, тем выше эффективность данного материала;

2. Обобщенный технико-экономический показатель — удельный расход цемента ( $\Pi$ ) на единицу прочности бетона [16; 17]:

$$\Pi_{R_{сж}}^{уд} = \frac{\Pi}{R_{сж}}, \quad (2)$$

где  $\Pi$  — расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;  $R_{сж}$  — предел прочности при сжатии, МПа.

Чем меньше величина этого показателя, тем эффективнее бетон.

Используя приведенные выше критерии рассмотрена возможность их совместного использования для анализа эффективности мелкозернистого фиброцементного бетона на тонких песках.

В процессе проведения исследования изучалось влияние комплексной дисперсно-армирующей органо-минеральной добавки в мелкозернистом бетоне на тонком песке на предел прочности при сжатии и растяжении при изгибе по ГОСТ 310,4-81<sup>1</sup>, плотность в нормальных условиях в возрасте 28 суток по ГОСТ 12730.1-2020.<sup>2</sup>

Результаты проведенных исследований [18] были использованы для расчета производных показателей характеризующих эффективность исследуемого материала — ККК и  $\Pi_{R_{сж}}^{уд}$ , которые были использованы в качестве целевых значений функции отклика.

Для изготовления образцов применялись следующие материалы:

- Вяжущее вещество — портландцемент ПЦ 500 Д0 Н по ГОСТ 10178-85.<sup>3</sup> Нормальная густота цементного теста 28,6 %. Предел прочности при сжатии, в возрасте 28 суток — 49,0 МПа. Предел прочности на изгиб — 5,9 МПа.
- Мелкий заполнитель — местный кварцевый песок — тонкий, с модулем крупности менее  $M_k = 1,0$  и насыпной плотностью — 1 466 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 8736-2014.<sup>4</sup>

Подбор контрольного состава мелкозернистого бетона производился по стандартным методикам по ГОСТ 27006-86.<sup>5</sup> На основании подобранного контрольного состава назначались составы с наполнителем, добавками и фиброй в соответствии с построенным планом эксперимента.

<sup>1</sup> ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. — Москва: Издательство стандартов, 2003. — 22 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. — Москва: Стандартинформ, 2021. — 8 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. — Москва, Стандартинформ, 2008. — 8 с.

<sup>4</sup> ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. — Москва, Стандартинформ, 2019. — 11 с.

<sup>5</sup> ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора составов. — Москва, Стандартинформ, 2008. — 7 с.

Оценка физико-механических характеристик исследуемых мелкозернистых бетонов производились стандартными методами ГОСТ 10180-2012.<sup>6</sup>

Оценка влияния комплексной дисперсно-армирующей органо-минеральной добавки на свойства и производные показатели была проведена посредством комплексных исследований с применением математического планирования эксперимента. В качестве рабочего плана был применен план полного факторного эксперимента — 2<sup>4</sup>.

Были установлены следующие факторы влияния, а именно расходов:

- тонкодисперсного наполнителя — конденсированного микрокремнезема МК-85;
- суперпластификатора «Полипласт СП-1», представляющий собой смесь полинафталинметилсульфанатов натрия;
- фибры базальтовой;
- добавки «Unticorprot»<sup>7</sup> предназначенной для придания бетону специальных свойств.

В таблице 1 приведены уровни и интервал изменения факторов.

**Таблица 1**

**Условия планирования эксперимента**

| Наименование факторов   |         | Уровни варьирования |             |              | Интервал варьирования |
|-------------------------|---------|---------------------|-------------|--------------|-----------------------|
| натуральное             | кодовое | нижний (-1)         | средний (0) | верхний (+1) |                       |
| Микрокремнезем МК-85    | X1      | 5                   | 17,5        | 30           | 12,5                  |
| Суперпластификатор СП-1 | X2      | 0,3                 | 0,55        | 0,8          | 0,25                  |
| Добавка «Unticorprot»   | X3      | 2                   | 3,5         | 5            | 1,5                   |
| Базальтовая фибра       | X4      | 0,05                | 0,125       | 0,2          | 0,075                 |

*Составлено автором*

**Таблица 2**

**Составы мелкозернистого фибробетона и результаты расчета оцениваемых критериев**

| Состав | Составы в натуральном виде |     |    |      | Оценочные критерии       |          |
|--------|----------------------------|-----|----|------|--------------------------|----------|
|        | X1                         | X2  | X3 | X4   | $\sigma_{Rcж}^{уд}$ (Y1) | ККК (Y2) |
| 1      | 2                          | 3   | 4  | 5    | 6                        | 7        |
| 1      | 5                          | 0,3 | 2  | 0,05 | 21,34                    | 13,55    |
| 2      | 30                         | 0,3 | 2  | 0,05 | 12,90                    | 16,62    |
| 3      | 5                          | 0,8 | 2  | 0,05 | 17,46                    | 16,44    |
| 4      | 30                         | 0,8 | 2  | 0,05 | 12,84                    | 16,85    |
| 5      | 5                          | 0,3 | 5  | 0,05 | 16,84                    | 16,77    |
| 6      | 30                         | 0,3 | 5  | 0,05 | 12,72                    | 16,75    |
| 7      | 5                          | 0,8 | 5  | 0,05 | 16,12                    | 17,61    |
| 8      | 30                         | 0,8 | 5  | 0,05 | 13,54                    | 15,89    |
| 9      | 5                          | 0,3 | 2  | 0,20 | 18,03                    | 15,65    |
| 10     | 30                         | 0,3 | 2  | 0,20 | 11,71                    | 17,93    |
| 11     | 5                          | 0,8 | 2  | 0,20 | 15,67                    | 17,92    |
| 12     | 30                         | 0,8 | 2  | 0,20 | 13,13                    | 16,45    |
| 13     | 5                          | 0,3 | 5  | 0,20 | 19,41                    | 15,23    |
| 14     | 30                         | 0,3 | 5  | 0,20 | 18,01                    | 12,02    |
| 15     | 5                          | 0,8 | 5  | 0,20 | 15,61                    | 18,45    |
| 16     | 30                         | 0,8 | 5  | 0,20 | 12,77                    | 16,94    |

*Составлено автором*

<sup>6</sup> ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. — Москва, Стандартинформ, 2018. — 36 с.

<sup>7</sup> ООО «Институт промышленной экологии». Режим доступа: <https://industrialecology.ru>.

В результате проведения эксперимента и на основании полученных результатов исследований произведены расчеты оценочных критериев эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке с комплексной органо-минеральной добавкой —  $C_{Rсж}^{уд}$  и ККК (табл. 2).

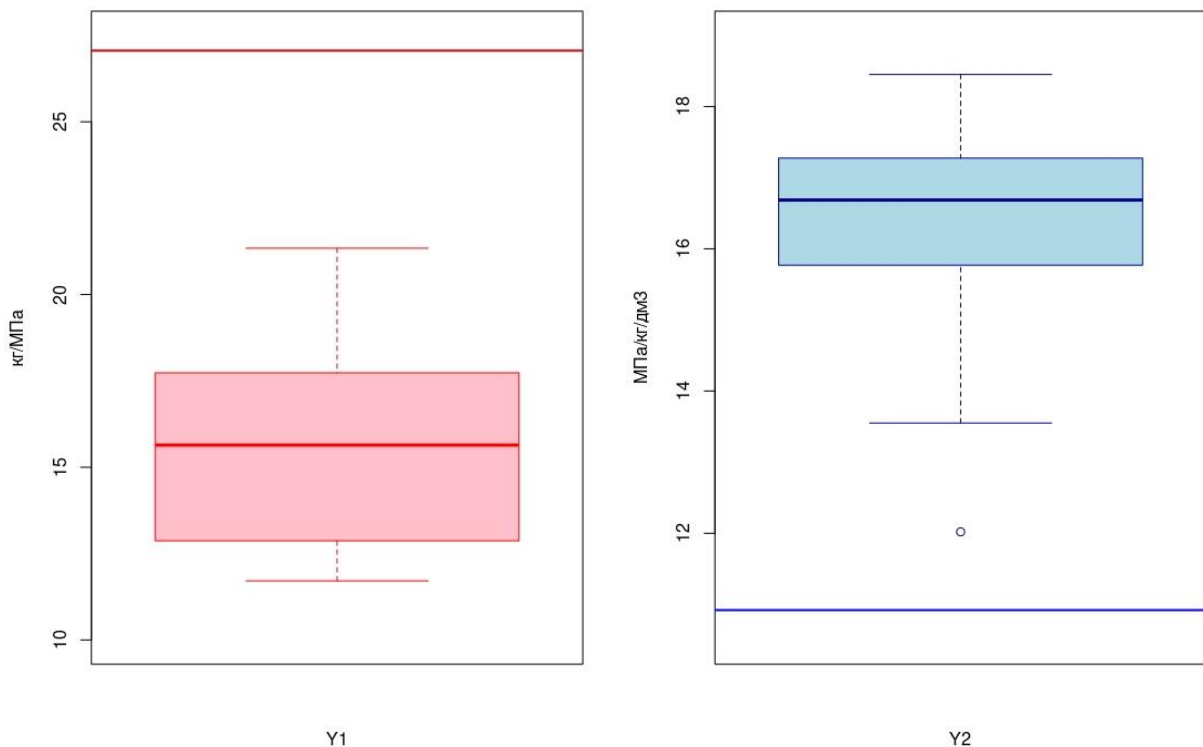
Первоначально было проведено описание распределения значений рассчитанных данных для каждой переменной при помощи числовых показателей, на наличие взаимосвязи между парами переменных. Цель данных процедур — дать ответ на ряд вопросов, а именно: каково распределение полученных значений (среднее, стандартное отклонение, медиана, размах значений и т. п.), какова корреляция между переменными и т. д.

Для вычисления описательных статистик воспользуемся базовыми возможностями языка R, а именно функцией `summary()`. Результат работы данной функции приведен на рисунке 1.

|          | X1    | X2    | X3   | X4     | Y1     | Y2     |
|----------|-------|-------|------|--------|--------|--------|
| Min.     | : 5.0 | :0.30 | :2.0 | :0.050 | :11.71 | :12.02 |
| 1st Qu.: | 5.0   | :0.30 | :2.0 | :0.050 | :12.88 | :15.83 |
| Median   | :17.5 | :0.55 | :3.5 | :0.125 | :15.64 | :16.68 |
| Mean     | :17.5 | :1.00 | :3.5 | :0.125 | :15.51 | :16.32 |
| 3rd Qu.: | :30.0 | :0.80 | :5.0 | :0.200 | :17.60 | :17.11 |
| Max.     | :30.0 | :8.00 | :5.0 | :0.200 | :21.34 | :18.45 |

**Рисунок 1.** Вывод результатов работы функции `summary()` (скриншот сделан автором)

Как видно из рисунка 1 функция `summary()` производит вычисление минимума, максимума, квартилей, медианы и среднего. Для наглядности визуализируем описательную статистику для значений функций отклика с помощью диаграммы размахов («ящик с усами»).



**Рисунок 2.** Диаграммы размахов для функций откликов (составлено автором)

Диаграммы размахов (рис. 2) демонстрируют распределение непрерывной переменной и отображают пять параметров: минимум, нижний квартиль (25-й процентиль), медиану (50-й процентиль), верхний квартиль (75-й процентиль) и максимум. Наряду с этим на

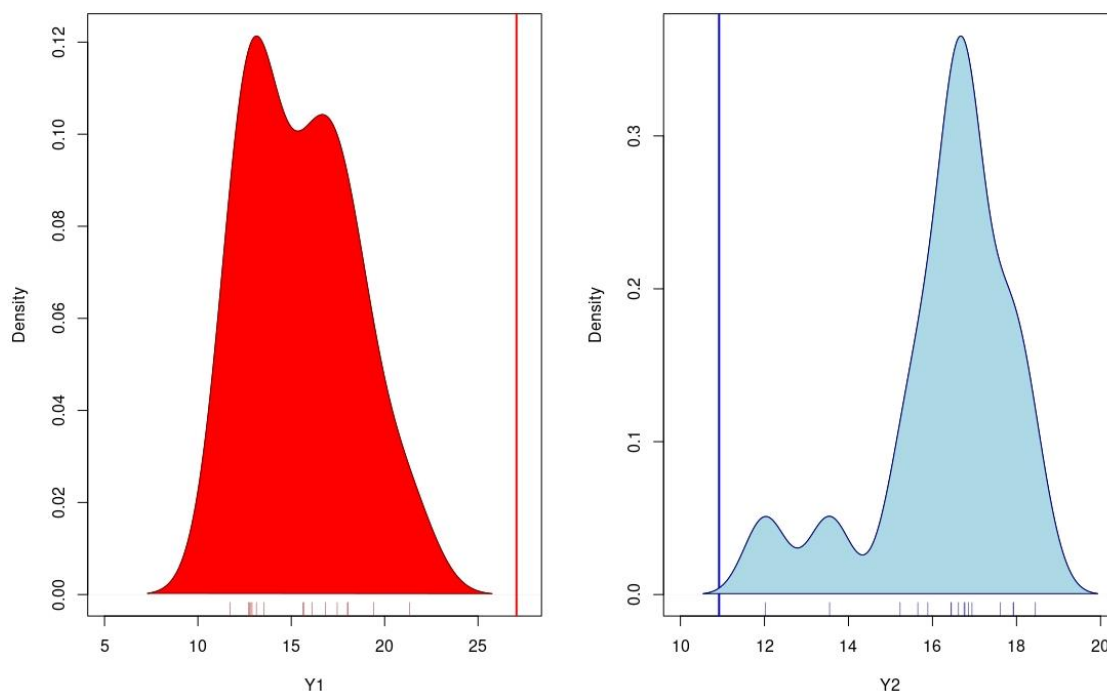
диаграмме могут быть отображены вероятные выбросы, т. е. значения, которые выходят за диапазон  $\pm 1,5$  межквартильного размаха, разности верхнего и нижнего квартилей. Такой выброс имеет место на диаграмме для функции отклика Y2, он отмечен, синей точкой. Каждый «ус» продолжается до минимального или максимального значения, которое не выходит за пределы  $\pm 1,5$  межквартильного размаха. Для диаграммы функции отклика Y1 наблюдается небольшой сдвиг распределения в положительную сторону (верхний «ус» длиннее нижнего), а для диаграммы Y2 имеет место небольшой сдвиг в отрицательную сторону (нижний «ус» длиннее верхнего). Горизонтальными линиями отмечены значения, полученные у контрольного состава.

На рисунке 3 приведены значения статистик для функций отклика Y1 и Y2, полученные с помощью функции `boxplot.stats()` языка R.

|  |  |
|--|--|
| <code>\$stats</code>                   | <code>\$stats</code>                   |
| [1] 11.710 12.870 15.640 17.735 21.340 | [1] 13.550 15.770 16.685 17.275 18.450 |
| <code>\$n</code>                       | <code>\$n</code>                       |
| [1] 16                                 | [1] 16                                 |
| <code>\$conf</code>                    | <code>\$conf</code>                    |
| [1] 13.71833 17.56168                  | [1] 16.09053 17.27948                  |
| <code>\$out</code>                     | <code>\$out</code>                     |
| numeric(0)                             | [1] 12.02                              |

**Рисунок 3.** Вывод значения статистик с помощью функции `boxplot.stats()`. Слева для функции отклика — Y1, справа для — Y2 (скриншот сделан автором)

Как видно из рисунка 3 для значений функции отклика Y1 медиана составляет 15,46 кг/МПа, 50 % значений попадают в диапазон между 12,870 и 17,735 кг/МПа, наименьшее значение равно 11,71 кг/МПа, а наибольшее 21,34 кг/МПа. Аналогично можно проанализировать данные для значений функции отклика Y2, однако в этом случае имеет место выброс, который равен 12,02 МПа/кг/дм<sup>3</sup>.



**Рисунок 4.** Диаграмма ядерной оценки функции плотности и график-щетка, для функций отклика Y1 и Y2 соответственно (составлено автором)

В случае наличия ограниченного объема данных рационально использовать непараметрические методы статистического анализа. Наиболее общей характеристикой, описывающей поведение одномерной случайной величины, является ее плотность распределения. На рисунке 4 приведены диаграммы ядерной оценки функции плотности и график — щетка для исследуемых функций отклика. Как видно из приведенных диаграмм они не в полной мере отвечают нормальному распределению, но близки к нему. Вертикальными линиями отмечены значения, полученные у контрольного состава.

Оценим силу линейной зависимости между исследуемыми переменными. Для расчета ковариации между переменными воспользуемся функцией `cov()` языка R.

|    | X1         | X2        | X3     | X4       | Y1         | Y2        |
|----|------------|-----------|--------|----------|------------|-----------|
| X1 | 166.666667 | 6.000000  | 0.000  | 0.000000 | -27.383333 | -1.808333 |
| X2 | 6.000000   | 3.546667  | 0.720  | -0.03600 | -1.174133  | -0.004400 |
| X3 | 0.000000   | 0.720000  | 2.400  | 0.000000 | 0.194000   | -0.175000 |
| X4 | 0.000000   | -0.036000 | 0.000  | 0.00600  | 0.002900   | 0.000550  |
| Y1 | -27.383333 | -1.174133 | 0.194  | 0.00290  | 8.066412   | -2.761813 |
| Y2 | -1.808333  | -0.004400 | -0.175 | 0.00055  | -2.761813  | 2.700783  |

**Рисунок 5.** Результат работы функции `cov()` (скриншот сделан автором)

Выполнение функции `cov()` выводит на экран таблицу ковариаций. В таблице приведены сочетания всех переменных со всеми. Как видно из рисунка 5 наименьшие значения ковариации имеют переменные X3 и X4. Наибольшую возрастающую ковариацию имеют переменные X1 и X2. Наименьшую убывающую ковариацию имеют переменные X1 и Y1, Y1 и Y2, X1 и Y2, Y1 и X2.

Для вычисления корреляционных коэффициентов Пирсона воспользуемся функцией `cor()` языка R.

|    | X1          | X2           | X3          | X4           | Y1          | Y2           |
|----|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| X1 | 1.000000000 | 0.246783824  | 0.000000000 | 0.000000000  | -0.74682999 | -0.085233294 |
| X2 | 0.24678382  | 1.000000000  | 0.24678382  | -0.246783824 | -0.21951643 | -0.001421666 |
| X3 | 0.000000000 | 0.246783824  | 1.000000000 | 0.000000000  | 0.04409161  | -0.068736528 |
| X4 | 0.000000000 | -0.246783824 | 0.000000000 | 1.000000000  | 0.01318203  | 0.004320582  |
| Y1 | -0.74682999 | -0.219516434 | 0.04409161  | 0.013182027  | 1.00000000  | -0.591710343 |
| Y2 | -0.08523329 | -0.001421666 | -0.06873653 | 0.004320582  | -0.59171034 | 1.000000000  |

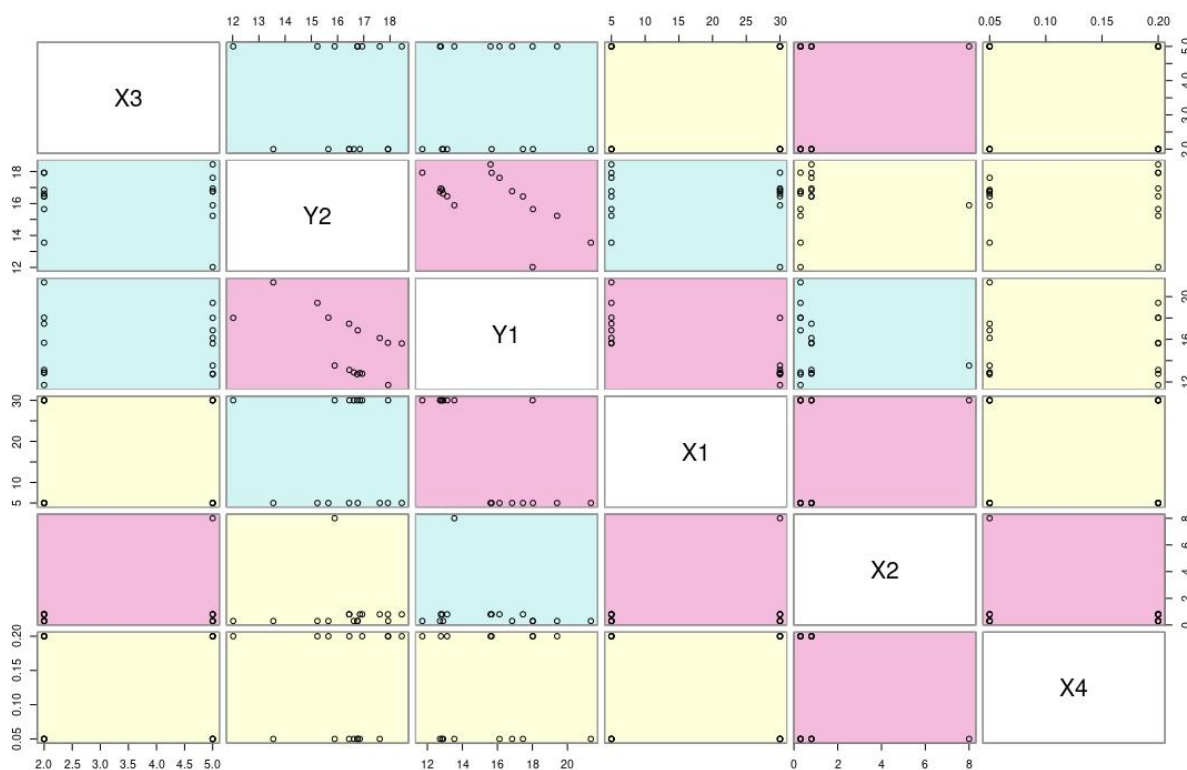
**Рисунок 6.** Результат работы функции `cor()` (скриншот сделан автором)

Табличная форма представления данных (рис. 6) не всегда позволяет быстро и легко их анализировать, поэтому произведем визуализацию полученных результатов. Для этого воспользуемся функцией `corrplot()` входящей в пакет расширений `gclus` языка R. Он позволяет упорядочить и раскрасить полученные результаты в соответствии с коэффициентами корреляции переменных.

Пары переменных, диаграммы для которых расположены ближе к главной оси, скоррелированы сильнее. Из диаграммы (рис. 7) видно, что наиболее высокие корреляции наблюдаются между Y1 и Y2, Y1 и X1, X1 и X2, X2 и X4 (розовые ячейки, ближе всего расположенные к главной диагонали). Наименьшая корреляция наблюдается между X3 и X4, X3 и X1 и т. д. (желтые ячейки, наиболее удаленные от главной оси). Синими ячейками выделены корреляции, имеющие среднюю силу.

Для оценки воспроизводимости опытов и адекватности уравнения регрессии была проведена проверка. Для которой использовалась выборка, включающая в себя значения предела прочности при сжатии в первых четырех опытах. При  $\alpha = 0,05$  расчетное значение критерия Кохрена составляет  $G_{\max} = 0,7144$ . Табличное значение критерия Кохрена

соответствует  $G_{кр} = 0,7679$ . Таким образом, проверка выборки по критерию Кохрена показывает, что  $G_{max} < G_{кр}$ . Критерий Фишера равен  $F = 0,37147$ , а его критическое значение составляет  $F_{кр} = 4,25649$ , т. е.  $F < F_{кр}$ . Следовательно, выборка отклика однородна и модель регрессии адекватна.



**Рисунок 7.** Матрица диаграмм рассеяния для исследованных переменных (составлено автором)

Результаты анализа плана эксперимента для удельного расхода цемента на единицу прочности бетона при сжатии приведены в таблице 3, в качестве примера.

**Таблица 3**

**Оцениваемые влияния и коэффициенты**

| Влияние   | Эффект | Коэффициент | T-значение | P-уровень |
|-----------|--------|-------------|------------|-----------|
| Константа |        | 15,51       | 50,75      | 0,000     |
| X1        | -4,108 | -2,05       | -6,72      | 0,000     |
| X2        | -1,728 | -0,86       | -2,83      | 0,018     |
| X1·X3     | 1,373  | 0,69        | 2,25       | 0,048     |
| X3·X4     | 1,572  | 0,79        | 2,57       | 0,028     |
| X2·X3·X4  | -1,517 | -0,76       | -2,48      | 0,032     |

Составлено автором

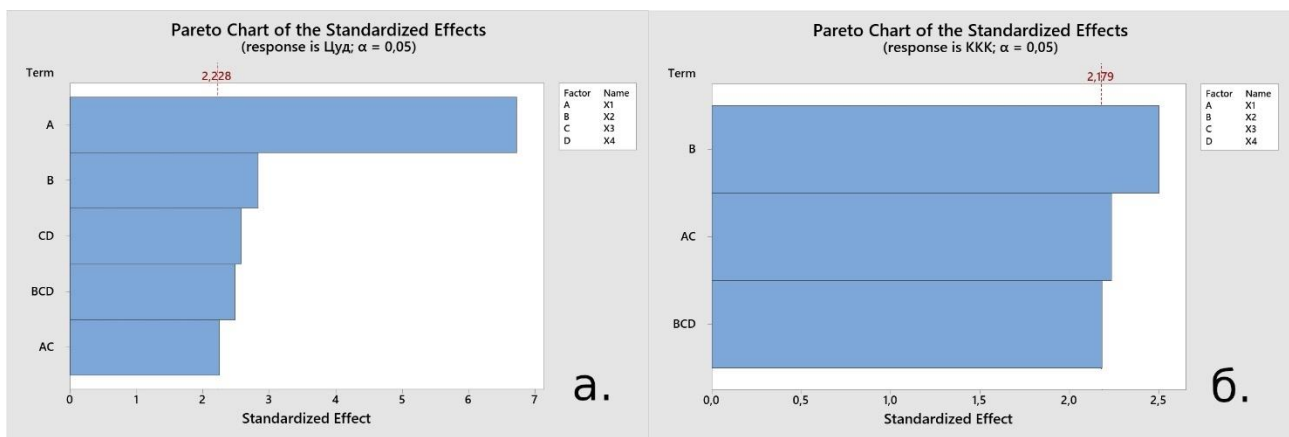
Целью проведенного анализа полученных данных и рассчитанных показателей является построение модели, которая будет включать основные влияния и взаимодействия, позволяющие наиболее полно описать отклики. В результате перебора ряда вариантов была получена модель, которая наиболее полно отражает влияние входных переменных и их взаимодействий на исследуемые отклики, а именно ККК и  $\Pi_{Рсж}^{уд}$ .

Воспользуемся значением P-уровня значимости в таблице 3, для определения значимости влияний. При  $\alpha = 0,05$  основные влияния — расход мелкодисперсного наполнителя МК-85 (X1) и расход суперпластификатора СП-1 (X2) является статистически значимым, т. к.



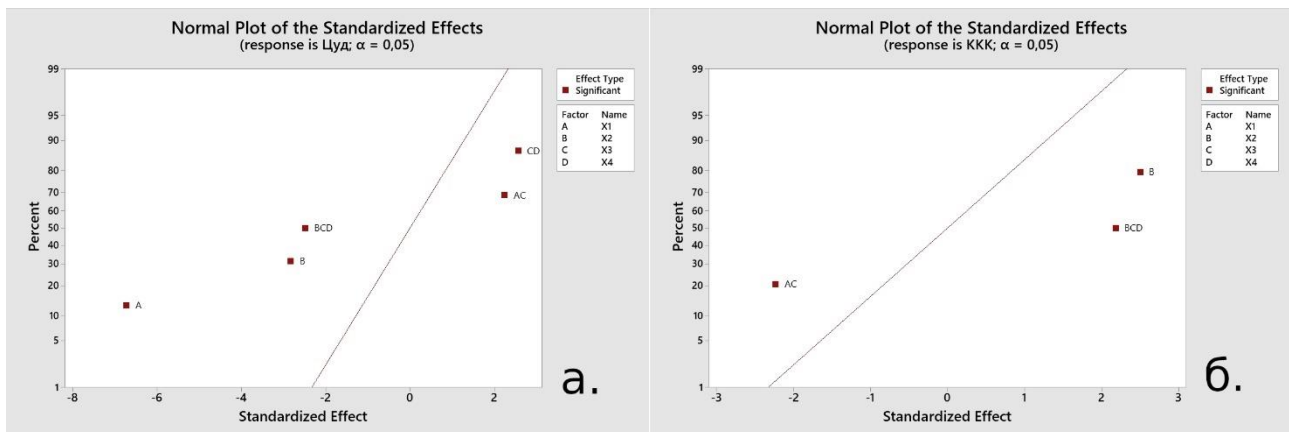
соответствующие значения вероятности менее 0,05. Наряду с ними статистически значимыми являются двойные взаимодействия — расход микрокремнезема МК-85 и добавки «Unticorprot» ( $X1 \cdot X3$ ), а также добавки «Unticorprot» и базальтовой фибры ( $X3 \cdot X4$ ). Помимо этого, статистически значимым является одно тройное взаимодействие — расход суперпластификатора СП-1, добавки «Unticorprot» и базальтовой фибры ( $X2 \cdot X3 \cdot X4$ ). Остальными факторами и их взаимодействиями можно пренебречь т.к. соответствующие им значения вероятности слишком высоки.

На основании имеющихся данных построены графики влияния с помощью, которых можно оценить значимость факторов и взаимодействий. На рисунке 8 приведена гистограмма Парето, на которой отображены абсолютные значения влияния факторов и взаимодействий. Красная линия указывает на границу, соответствующую табличному значению критерия Стьюдента. Факторы и взаимодействия факторов, у которых рассчитанные значения критерия Стьюдента превышают табличные (т.е. пересекают линию) являются статистически значимыми.



**Рисунок 8.** Оценка влияния факторов по закону Парето: а — для  $\zeta_{Рсж}^{уд}$ ; б — для ККК (составлено автором)

На рисунке 9 представлена оценка влияния факторов по нормальному закону распределения.



**Рисунок 9.** Оценка влияния факторов по нормальному закону распределения: а — для  $\zeta_{Рсж}^{уд}$ ; б — для ККК (составлено автором)

На графике (рис. 9) приведены только значимые факторы в соответствии с нормальным законом распределения.

Приведенные в таблице 3 коэффициенты для полинома оригинальной функции были использованы для построения полной модели для функции отклика —  $Ц_{Rcж}^{уд}$ , которая имеет следующий вид:

$$Ц_{Rcж}^{уд} = 15,51 - 2,05X_1 - 0,86X_2 + 0,69X_1X_3 + 0,79X_3X_4 - 0,76X_2X_3X_4 + \varepsilon, \quad (3)$$

а для коэффициента конструктивного качества:

$$ККК = 16,32 + 0,75X_2 - 0,67X_1X_3 + 0,66X_2X_3X_4 + \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  — отклонения наблюдаемых значений от модельных, сумма которых для функции отклика  $Ц_{Rcж}^{уд}$  равна 1,22211, а для ККК соответственно 1,20300, т. е. эти значения достаточно близки.

Общую (предварительную) оценку адекватности полученных моделей можно осуществить с помощью коэффициента детерминации R-Sq ( $R^2$ ). Для модели с функцией отклика  $Ц_{Rcж}^{уд}$  он составляет — 87,66 %. Эту модель можно признать достаточно хорошей, что указывает на очень высокую степень соответствия модели экспериментальным данным. Для модели с функцией отклика ККК он составляет — 57,13 %, т. е. модель можно охарактеризовать как приемлемую.

Таким образом, проводя сравнительный анализ уравнений регрессии (3) и (4), можно констатировать следующее. Уравнение регрессии (3), описывающее зависимость  $Ц_{Rcж}^{уд}$  от влияющих факторов и их взаимодействий содержит на два члена больше, чем для уравнения (4) — ККК. Одним из них является мелкодисперсный наполнитель — микрокремнезем. Это хорошо согласуется с сущностью переменной (величиной) отклика, в которой учитывается расход вяжущего — портландцемента и соответственно оказывает непосредственное влияние на величину показателя. Вторым является взаимодействие расхода мелкодисперсного наполнителя на расход добавки «Unticorprot».

Для показателя ККК влияние микрокремнезема и базальтовой фибры сведены к минимуму. Больше влияние оказывает расход суперпластификатора и добавки «Unticorprot».

Необходимо отметить влияние фактора микрокремнезема ( $X_1$ ) и суперпластификатора ( $X_2$ ), а также взаимодействий с их участием ( $X_1 \cdot X_3$  и  $X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$ ). В меньшей степени влияет на  $Ц_{Rcж}^{уд}$  — расход добавки «Unticorprot», т. к. она встречается только во взаимодействиях: два двойных и одно тройное. Наименьшее влияние на  $Ц_{Rcж}^{уд}$  оказывает расход базальтовой фибры, т. к. встречается только в одном двойном и одном тройном взаимодействии.

Проведем анализ уравнения регрессии (3), параллельно с графиком нормального распределения, представленного на рисунке 9 а, зависимости  $Ц_{Rcж}^{уд}$  от влияющих факторов и их взаимодействий.

Из формулы (3) видно, что уравнение содержит две переменные с положительными коэффициентами, три переменные с отрицательными коэффициентами и один положительный свободный член (постоянная). В данном случае можно говорить о том, что если бы мы не использовали никаких добавок (т. е. все факторы  $X$  были бы равны нулю), то величина  $Ц_{Rcж}^{уд}$  для исследуемого мелкозернистого бетона на тонком песке составляла бы 15,51 кг/МПа. Коэффициенты при факторах (переменных) и их взаимодействиях показывают, что наибольшее влияние на  $Ц_{Rcж}^{уд}$  оказывает микрокремнезем, причем он приводит к двухкратному снижению

при изменении его на одну единицу. Подобное расходу микрокремнезема влияние оказывает расход суперпластификатора, с коэффициентом — 0,86, а также взаимодействие  $X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$ . Отрицательное влияние на величину  $\Pi_{Rcж}^{уд}$  оказывают двойное взаимодействие  $X_1 \cdot X_3$  и  $X_3 \cdot X_4$ . Эти взаимодействия способствуют увеличению  $\Pi_{Rcж}^{уд}$  с коэффициентами 0,69 и 0,79 соответственно.

Уравнение регрессии (4) для функции отклика ККК и графика нормального распределения, представленного на рисунке 9 б, показывает, что постоянный (свободный) член составляет 16,317. Следовательно, в случае, когда все факторы равны нулю, то есть применяется только портландцемент, тогда ККК равен 16,32. Положительное влияние на ККК оказывают фактор  $X_2$  — расход суперпластификатора — 0,75 на каждую единицу и взаимодействие —  $X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$ . Однако величина последнего составляет 0,66 на каждую единицу. Отрицательно на величину ККК влияет взаимодействие  $X_1 \cdot X_3$ , с величиной 0,67 на каждую единицу. Необходимо отметить общее для обоих уравнений регрессии, а именно в обоих уравнениях имеет место фактор  $X_2$ , незначительно отличающийся по значению, но разный по знаку. В обоих уравнениях имеет место взаимодействие  $X_1 \cdot X_3$ , с близкими значениями и противоположными по знаку. В обоих уравнениях присутствует тройное взаимодействие  $X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$  с разницей по величине 0,1 и противоположными по знаку.

Следует отметить, что для обоих уравнений регрессии показательно наличие во взаимодействиях фактора  $X_3$  — расход добавки «Unticorprot». В обоих уравнениях (3) и (4) этот фактор встречается во всех взаимодействиях, хотя отдельно, как фактор он отсутствует в уравнениях.

Упорядочим результаты расчета показателей для всех серий по убыванию значения  $\Pi_{Rcж}^{уд}$  (табл. 4).

Таблица 4

Упорядоченные по  $\Pi_{Rcж}^{уд}$  результаты исследований

| № состава | Факторы |     |    |      | Оценочные критерии |       |
|-----------|---------|-----|----|------|--------------------|-------|
|           | X1      | X2  | X3 | X4   | $\Pi_{Rcж}^{уд}$   | ККК   |
| 1         | 5       | 0,3 | 2  | 0,05 | 21,34              | 13,55 |
| 13        | 5       | 0,3 | 5  | 0,20 | 19,41              | 15,23 |
| 9         | 5       | 0,3 | 2  | 0,20 | 18,03              | 15,65 |
| 14        | 30      | 0,3 | 5  | 0,20 | 18,01              | 12,02 |
| 3         | 5       | 0,8 | 2  | 0,05 | 17,46              | 16,44 |
| 5         | 5       | 0,3 | 5  | 0,05 | 16,84              | 16,77 |
| 7         | 5       | 0,8 | 5  | 0,05 | 16,12              | 17,61 |
| 11        | 5       | 0,8 | 2  | 0,20 | 15,67              | 17,92 |
| 15        | 5       | 0,8 | 5  | 0,20 | 15,61              | 18,45 |
| 8         | 30      | 0,8 | 5  | 0,05 | 13,54              | 15,89 |
| 12        | 30      | 0,8 | 2  | 0,20 | 13,13              | 16,45 |
| 2         | 30      | 0,3 | 2  | 0,05 | 12,90              | 16,62 |
| 4         | 30      | 0,8 | 2  | 0,05 | 12,84              | 16,85 |
| 16        | 30      | 0,8 | 5  | 0,20 | 12,77              | 16,94 |
| 6         | 30      | 0,3 | 5  | 0,05 | 12,72              | 16,75 |
| 10        | 30      | 0,3 | 2  | 0,20 | 11,71              | 17,93 |

Составлено автором

Наилучшие четыре результата по удельному расходу цемента на единицу прочности (в порядке возрастания) соответствуют составам: 10, 6, 16 и 4. Наихудшие четыре результата по удельному расходу цемента на единицу прочности (в порядке возрастания): 14, 9, 13 и 1. Составы со средними показателями — 11 и 15. При этом интервал вариации показателя составляет  $\Pi_{R_{сж}}^{уд} = 21,34 - 11,71 = 9,63$  кг/МПа.

Упорядочим результаты расчета показателей для всех серий по возрастанию для показателя ККК (табл. 5). Наилучшие четыре результата по величине ККК имеют (в порядке убывания) составы: 15, 10, 11 и 7. Наихудшие четыре результата соответствуют тем же составам, что и в случае сортировки по показателю  $\Pi_{R_{сж}}^{уд}$ , однако в другой последовательности (в порядке убывания), а именно: 9, 13, 1 и 14. Результаты, соответствующие медиане показывают два состава — 6 и 2. Эти составы не совпадают с номерами составов медианы отсортированных по  $\Pi_{R_{сж}}^{уд}$ .

Таблица 5

Упорядоченные по ККК результаты исследований

| № состава | Факторы |     |    |      | Оценочные критерии  |       |
|-----------|---------|-----|----|------|---------------------|-------|
|           | X1      | X2  | X3 | X4   | $\Pi_{R_{сж}}^{уд}$ | ККК   |
| 14        | 30      | 0,3 | 5  | 0,20 | 18,01               | 12,02 |
| 1         | 5       | 0,3 | 2  | 0,05 | 21,34               | 13,55 |
| 13        | 5       | 0,3 | 5  | 0,20 | 19,41               | 15,23 |
| 9         | 5       | 0,3 | 2  | 0,20 | 18,03               | 15,65 |
| 8         | 30      | 0,8 | 5  | 0,05 | 13,54               | 15,89 |
| 3         | 5       | 0,8 | 2  | 0,05 | 17,46               | 16,44 |
| 12        | 30      | 0,8 | 2  | 0,20 | 13,13               | 16,45 |
| 2         | 30      | 0,3 | 2  | 0,05 | 12,90               | 16,62 |
| 6         | 30      | 0,3 | 5  | 0,05 | 12,72               | 16,75 |
| 5         | 5       | 0,3 | 5  | 0,05 | 16,84               | 16,77 |
| 4         | 30      | 0,8 | 2  | 0,05 | 12,84               | 16,85 |
| 16        | 30      | 0,8 | 5  | 0,20 | 12,77               | 16,94 |
| 7         | 5       | 0,8 | 5  | 0,05 | 16,12               | 17,61 |
| 11        | 5       | 0,8 | 2  | 0,20 | 15,67               | 17,92 |
| 10        | 30      | 0,3 | 2  | 0,20 | 11,71               | 17,93 |
| 15        | 5       | 0,8 | 5  | 0,20 | 15,61               | 18,45 |

Составлено автором

Среди наиболее общих черт присущих всем составам с наихудшими расчетными показателями для исследованных функций отклика следует отметить:

- низкий расход микрокремнезема;
- низкий расход суперпластификатора;
- высокий расход базальтовой фибры.

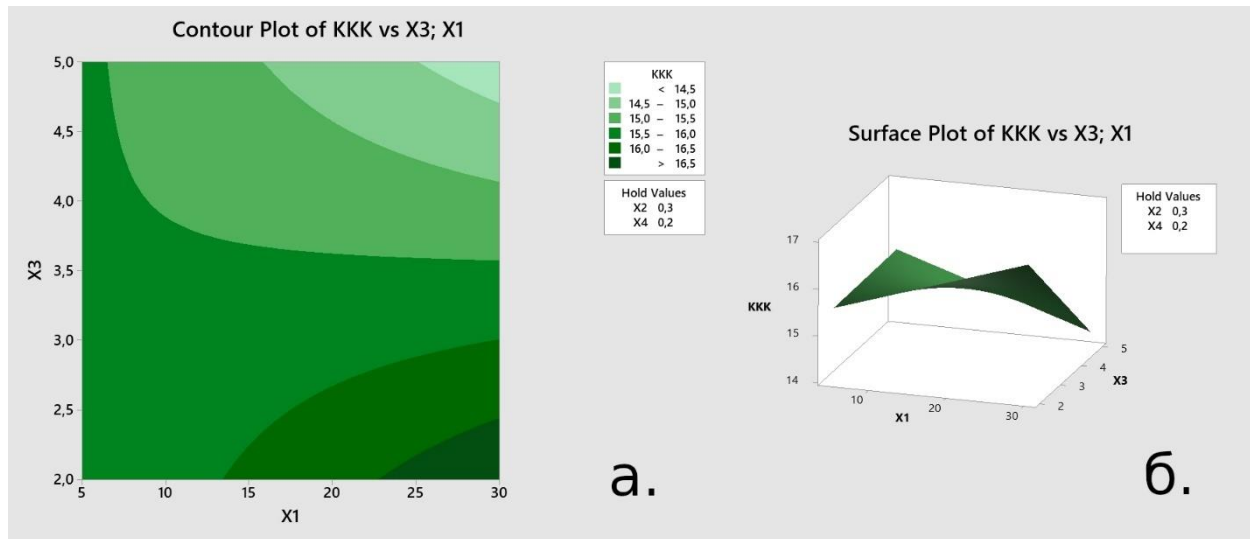
Однозначно судить о наилучших составах сложнее, однако следует отметить, что расход микрокремнезема — это основной фактор, влияющий на величину показателя  $\Pi_{R_{сж}}^{уд}$ . В случае использования функции отклика — ККК основными факторами, влияющими на нее, являются:

- наименьший расход микрокремнезема;
- наибольший расход суперпластификатора;
- наибольший расход базальтовой фибры.

Подводя итог изложенному выше, мы приходим к заключению, что по совокупности показателей наиболее эффективным составом следует признать состав № 10.

В качестве примера приведем контурный график и график поверхности для зависимости  $\Pi_{Рсж}^{уд}$  от факторов X4 (расход базальтовой фибры) и X3 (расход добавки «Unticorprot»), для значений X1 (расход микрокремнезема), равном — 17,5 % и X2 (расход суперпластификатора), равном — 0,55 %.

На рисунке 4 приведены контурный график и график поверхности для зависимости ККК от X3 (расход добавки «Unticorprot») и X1 (расход микрокремнезема), для расходов X2 (расход суперпластификатора), равном 0,55 % и X4 (расход базальтовой фибры), равном — 0,125 %.



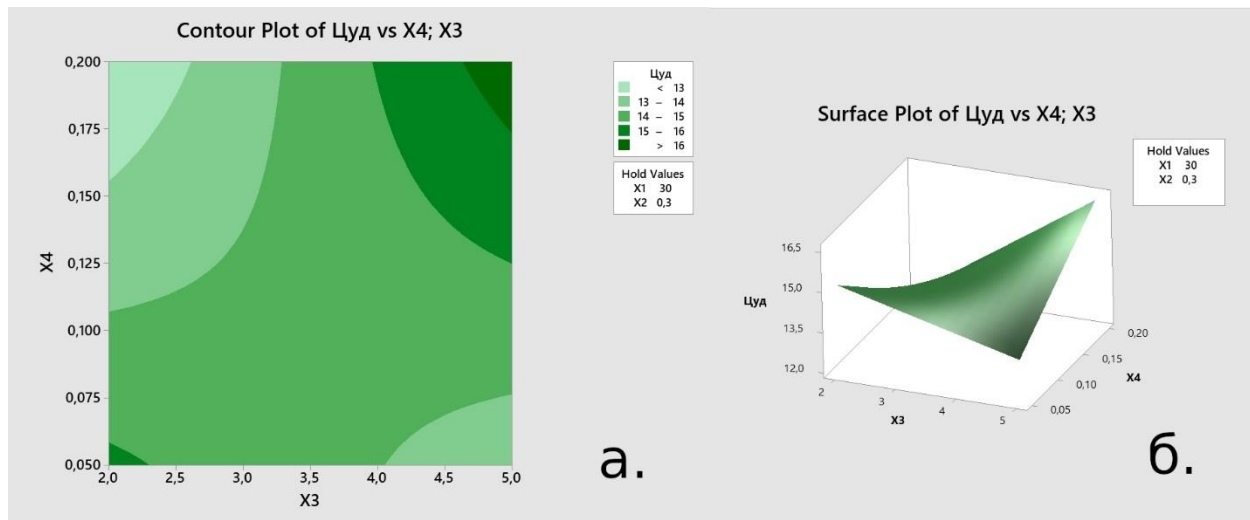
**Рисунок 10.** Контурный график (а) и график поверхности (б) зависимости ККК от расхода добавки «Unticorprot» и микрокремнезема (составлено автором)

На графиках, приведенных, на рисунке 10 наглядно показано, что с ростом расхода микрокремнезема и добавки «Unticorprot», а также при уменьшении расхода этих компонентов до минимума величина ККК стремится к минимальным значениям. В то же время, когда расход одного из компонентов достигает минимума, а другого максимума и наоборот величина ККК стремится к максимальным значениям. Наибольшее значение ККК достигает при максимальном расходе микрокремнезема и минимальном расходе добавки «Unticorprot».

Контурный график и график поверхности (рис. 10) иллюстрируют, что для состава № 10 принятого нами как оптимальный (наилучший) наибольшее значение ККК наблюдается (имеет место) в области соответствующей расходам добавки «Unticorprot» 2,0–2,3 % и мелкодисперсного наполнителя в интервале 23–30 % от массы цемента.

Графики, приведенные на рисунке 11, показывают, что с увеличением расхода добавки «Unticorprot» и базальтовой фибры отмечается рост значения  $\Pi_{Рсж}^{уд}$ . Наряду с этим при различных значениях указанных компонентов величина  $\Pi_{Рсж}^{уд}$  стремится к минимальным значениям.

На приведенном, на рисунке 11 а контурном графике зависимости  $\Pi_{Рсж}^{уд}$  от расхода добавки «Unticorprot» и базальтовой фибры наилучшим (наименьшим) значениям соответствует область с расходом добавки «Unticorprot» в интервале 4,75–5,00 % и базальтовой фибры 0,175–0,200 %.



**Рисунок 11.** Контурный график (а) и график поверхности (б) зависимости  $\sigma_{Rcж}^{уд}$  от расхода базальтовой фибры и добавки «Unticorprot» (составлено автором)

Для контрольного состава  $\sigma_{Rcж}^{уд} = 27,06$ , ККК = 10,92. Таким образом использование тонкого песка можно компенсировать комплексной добавкой, при этом показатель  $\sigma_{Rcж}^{уд}$  улучшается на 82,24 % по сравнению с контрольным. Показатель ККК по сравнению с контрольным составом показал прирост — 53,49 %.

В результате обработки экспериментальных данных была получена модель, адекватно описывающая влияние исследованных факторов на пределы прочности при сжатии, ККК и  $\sigma_{Rcж}^{уд}$ . Проверка адекватности полученного уравнения по критерию Фишера показала удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Результаты проведенных исследований, расчетов и их анализ позволил оценить эффективность мелкозернистого фибробетона на тонком песке модифицированного комплексной дисперсно-армирующей органо-минеральной добавкой. Установлено, что оптимальные показатели эффективности показывает материал № 10 в состав, которого входят: микрокремнезема — 30 %; суперпластификатора — 0,3; добавки «Unticorprot» — 2,0 % и базальтовой фибры — 0,2 %.

Совместное использование базальтового волокна, микрокремнезема, суперпластификатора и добавки «Unticorprot» в определенных дозировках позволяет получить наилучшие показатели ККК и  $\sigma_{Rcж}^{уд}$ . Подтверждена перспективность использования многофакторных экспериментально-статистических моделей, которые позволяют установить связь и количественные соотношения между показателями качества материала, рецептурно-технологическими факторами и показателями эффективности получаемых материалов.

Применение различных программных продуктов позволяет снизить затраты времени на проведения анализа экспериментальных данных и частично их автоматизировать. Анализ результатов проведенных исследований и расчетов показал, что введение в мелкозернистый фибробетон, на тонком песке микрокремнезема в количестве 27–30 % положительно сказывается на его эффективности при использовании других составляющих комплексной добавки в наименьшем количестве.

Полученные математические модели и уравнения регрессии являются адекватными. Они подтверждают положительное влияние использованной комплексной дисперсно-армирующей органо-минеральной добавки для повышения эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке и следовательно могут использоваться при проектировании состав такого бетона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Звездов А.И. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре / А.И. Звездов, В.Р. Фаликман // Жилищное строительство. № 7. 2008. стр. 2–5.
2. Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций / Ю.М. Баженов. — М.: Госстройиздат, 1963. — 128 с.
3. Баженов Ю.М. Опыт применения песчаного бетона в жилищном строительстве / Ю.М. Баженов, Е.С. Темкин, А.Б. Кузанов, В.Т. Филипский // Бетон и железобетон. — М., 1973. — № 5. С. 3–4.
4. Несветаев Г.В. К вопросу оценки морозостойкости бетонов по критерию прочности / Г.В. Несветаев, А.В. Долгова, Л.В. Постой // Инженерный вестник дона. № 7. 2019. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6106>.
5. Вольф А.В. Влияние химических добавок на свойства мелкозернистых песчаных бетонов / А.В. Вольф, В.К. Козлова, А.М. Маноха // Ползуновский альманах. № 2. Т. 1. 2020. С. 50–54.
6. Боровских И.В. Роль суперпластификатора в формировании прочности мелкозернистого бетона / И.В. Боровских, Н.М. Морозов, А.Ф. Галеев // Международный научный журнал «Символ науки». № 8. 2016. С. 76–78.
7. Макаренко С.В. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона / С.В. Макаренко, Б.М. Лозовский, О.В. Хохряков, В.Г. Хозин // Известия КГАСУ. № 3(53). 2020. С. 39–46.
8. Ильина Л.В. Влияние дисперсных минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона / Л.В. Ильина, С.А. Хакимуллина, Д.А. Кадорких // Фундаментальные исследования. № 4. 2017. С. 34–38.
9. Касымов Т.М. Исследование влияния рубленного базальтового волокна на прочностные свойства мелкозернистого бетона / Т.М. Касымов, Н.С. Кудайбергенов // Наука и инновационные технологии. № 1(14). 2020. С. 95–104. DOI: 10.33942/sit.neso14.
10. Ерошкина Н.А. Применение полипропиленовой микрофибры в технологии геополимерного мелкозернистого бетона / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, М.Ю. Чамурлиев // Инженерный вестник дона. № 2. 2018. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5024>.
11. Яковлев Г.И. Влияние комплексной добавки на основе отходов асбестоцементных изделий и покрышек на свойства мелкозернистых бетонов / Г.И. Яковлев, А.А. Вдовин, А.Ф. Гордина, А.Н. Зорин, С.А. Поторочина // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 58–61.

12. Соколов П.Э. Анализ основных физико-механических свойств мелкозернистого фибробетона на тонком песке, модифицированного комплексной добавкой / П.Э. Соколов, В.В. Вовко, В.Г. Поляков, С.В. Лукьяница // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 114–128.
13. Скрипникова Н.К. Мелкозернистый бетон с использованием отходов металлургии / Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов, Д.К. Григорьевская, М.А. Семеновых, И.Ю. Юрьев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 2. Т. 21. С. 185–191. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-185-191.
14. Танг В.Л. Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии / В.Л. Танг, Б.И. Булгаков, О.В. Александров // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 9(108). С. 999–1009. DOI:10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65.
15. Хархардин А.Н. Повышение эффективности мелкозернистых бетонов при использовании модифицированного портландцементного вяжущего / А.Н. Хархардин, Я.Ю. Вишневецкая, Н.И. Алфимова // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 50–56.
16. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // Строительные материалы. 2016. № 1-2. С. 96–103.
17. Володин В.М. Анализ эффективности песчаных бетонов по удельному расходу цемента на единицу прочности / В.М. Володин, М.Н. Мороз, В.И. Калашников, Д.А. Абрамов, И.В. Ерофеев // Молодой ученый. № 8(88). 2015. С. 205–208.
18. Соколов П.Э. Использование комплексной модифицирующей добавки для расширения сырьевой базы мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов / П.Э. Соколов, В.В. Вовко, С.В. Лукьяница, А.С. Ломов, В.Б. Черников // Инженерный вестник Дона. № 1. 2022. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7392>.



**Sokolov Petr Eduardovich**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

E-mail: [pr7391@yandex.ru](mailto:pr7391@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3960-5010>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=439730](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439730)

## **Increasing of efficiency of fine fiber concrete on fine sand by means of a complex additive**

**Abstract.** The article deals with such an urgent theme as expansion of raw materials sources of fine concretes owing to fine sands usage. Application of fine sands in fine concretes is connected with a number of problems, like an increase of cohesive material discharge, change of rheological characteristics of fine mixtures, strength retrogression of fine concretes and degradation of their efficiency as a material. To solve all these problems there was used a complex organic-mineral additive consisting of fine-dispersed filling compound, fluidifier, basaltic fiber and, «Unticorprot» additive. To estimate the complex additive influence on the efficiency of the fine concrete there were fabricated check samples as well as those of different combinations in correspondence with a chosen plan of the complete four-factor experiment. In order to receive initial data necessary for the subsequent indicators calculations of the efficiency of fine concretes on fine sand with the complex additive there were applied standard methods of ultimate strength definition under pressure with an average density. The author has presented the calculated indexes of fine fiber concretes compositions efficiency which were received on the basis of the research results. As efficiency indexes of fine concrete compositions there were used a constructive quality ratio and cement elementary discharge per concrete strength unit. In the article there are the descriptive statistics cited and their analysis held. There were received mathematical models for response functions, namely constructive quality ratio and cement elementary discharge per concrete strength unit. The estimation of their faithfulness and adequacy was made. There was identified optimal consumption of the components of organic-mineral additive which allows receive fine concrete on fine sand with better indexes of both constructive quality ratio and cement elementary discharge per concrete strength unit.

**Keywords:** fine fiber concrete; fine sand; raw materials sources; complex additive; effectiveness; criterion of efficiency; planning an experiment; descriptive statistics; analysis; mathematical model