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

2024, Том 16, № 2 / 2024, Vol. 16, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2024.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/65SAVN224.pdf

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Соколов, П. Э. Результаты исследования влияния комплексной добавки на скорость набора прочности и прочность мелкозернистого бетона / П. Э. Соколов // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/65SAVN224.pdf

For citation:
Sokolov P.E. Results of the research of a complex additive influence on strength gaining rate and on fine concrete strength itself. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2): 65SAVN224. Available at: https://esj.today/PDF/65SAVN224.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
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3960-5010
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439730

Результаты исследования влияния комплексной добавки на скорость набора прочности и прочность мелкозернистого бетона

Аннотация. В статье приведены результаты исследований влияния комплексной модифицирующей добавки на скорость набора прочности и прочность мелкозернистого бетона. Выполнена оценка одного из способов повышения ранней прочности мелкозернистого бетона и скорости набора прочности, за счет использования комплексной органоминеральной добавки. Компоненты, входящие в состав комплексной добавки, позволили получить увеличение темпа роста и уровня прочности, что в свою очередь способствует снижению энергетических затрат в технологии производства бетонных и железобетонных изделий, а также улучшению его основных свойств. Для проведения исследований был применен центральный композиционный план, что позволило определить оптимальные расходы компонентов комплексной модифицирующей добавки, позволяющих достичь наибольшей скорости набора прочности на ранних сроках твердения. Автором проведен предварительный анализ полученных результатов исследований, получены их описательные статистики, которые представлены в статье в виде диаграмм и графиков. Анализ результатов исследований позволил получить уравнения регрессии и установить степень влияния компонентов комплексной добавки на скорость набора прочности и прочность мелкозернистого бетона. Полученные автором уравнения регрессии позволили построить совмещенные пространственные графики поверхностей для исследованных функций откликов. Проведена оптимизация состава модифицированного мелкозернистого бетона и установлен состав комплексной добавки, позволяющий получить высокий темп роста прочности и прочность мелкозернистого бетона на ранних сроках твердения, с использованием функции желательности. Разработаны эффективные составы быстротвердеющих мелкозернистых бетонов, модифицированных органоминеральной добавкой. При проведении исследований использовались стандартные методики оценки скорости набора прочности и прочности бетона.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон; комплексная добавка; скорость набора прочности; суперпластификатор; ускоритель; микрокремнезем

Введение

Основные направления развития строительной отрасли в настоящее время заключается в ускорении темпов производства, получении качественных и долговечных материалов, при условии снижение затрат на их производство. Высокая скорость набора прочности на ранних сроках твердения бетона считается важным показателем, позволяющим снизить энергетические затраты на тепловую обработку и интенсифицировать производство бетона и железобетона.

Цель работы заключается в изучении возможности повышения ранней прочности и скорости набора прочности мелкозернистого бетона модифицированного комплексной органоминеральной добавкой.

Задача исследования заключалась в оценке влияния комплексной модифицирующей добавки на скорость набора прочности и прочностные характеристики мелкозернистого бетона.

Применение современных химических добавок является наиболее универсальным, доступным и гибким способом регулирования свойств бетонных смесей и бетона, а также управления технологией бетона. Повсеместное применение имеет весь спектр химических добавок, и в первую очередь добавок регулирующих свойства бетонных смесей, схватывания и твердения бетона и т. п. [1]. Помимо этого, все чаще используются минеральные тонкомолотые наполнители различного происхождения [2]. Применение химических добавок позволяет регулировать как свойства бетонных смесей, так и свойства бетонов в широких пределах и при этом практически не усложняет сложившуюся технологию производства.

В настоящее время широко используются бесщелочные добавки ускорители схватывания и твердения, обладающие высокой эффективностью и отвечающие требованиям, установленным стандартами по содержанию $N_2O \leq 1{,}0$ % по массе [3; 4].

Применение комплексных модифицирующих добавок является одним из способов разработки бетонов ускоренного твердения, т. к. они способствуют интенсификации процессов гидратации минералов клинкера и ускоряют кристаллизацию новообразований [5].[1] Оценить величину технического эффекта от введения таких добавок и эффективность их воздействия на бетонную смесь в целом возможно по изменению прочности в различные моменты времени.[2]

Результаты экспериментальных исследований и испытаний, выполненные многими исследователями, показывают, что использование комплексных органоминеральных добавок в мелкозернистых бетонах приводит к значительным изменениям всех групп свойств этих материалов [6; 7]. Систематизация и анализ экспериментальных данных о влиянии комплексных добавок [8] и вида цемента [9; 10] на свойства мелкозернистых бетонов является важной (необходимой) работой, т. к. позволяет в перспективе создать базу данных, которая может пополняться, совершенствоваться и подвергаться анализу.

Совместное введение в состав бетона на стадии изготовления химических добавок и активных минеральных наполнителей является одним из наиболее эффективных и в то же время гибких способов регулирования процессов его твердения и набора прочности [11; 12].

[1] Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. — М.: АСВ, 2011. — 528 с.

[2] ГОСТ 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. М.: Стандартинформ. 2010. 18 с.

Добавки-ускорители схватывания и твердения занимают особое место в технологии товарного и сборного бетона и железобетона вследствие (ощутимого, явного) значимого эффекта от их использования. Для бетонов всех видов и всех способов твердения актуальным является сокращение сроков схватывания и интенсификация процессов твердения [13].

Исследования влияния комплексных органоминеральных модификаторов на кинетику твердения бетонов показал высокую эффективность применения комплексных добавок, направленных на уменьшение водопотребности и ускорения кинетики ранней прочности [14].

Метод

При проведении исследований использовался портландцемент М500-Д0 Вольского цементного завода, класса ЦЕМ I 42,5Н. В качестве мелкого заполнителя применялся природный кварцевый песок, с модулем крупности $М_к$ = 2,6.

При проведении исследований в качестве химических модификаторов использовались следующие добавки: суперпластификатор Sika ViscoCreete 200 и добавка ускоритель твердения Sika Rapid 22.

В качестве минеральной составляющей органоминеральной добавки использовался микрокремнезем уплотненный МКУ-85.

В качестве критерия оценки скорости набора прочности мелкозернистого бетона использовалась величина отношения предела прочности при сжатии в возрасте 2 суток[3], к пределу прочности при сжатии в возрасте 28 суток.[4] Интервалы варьирования количества составляющих компонентов комплексной добавки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия проведения эксперимента

Фактор		Уровни фактора, %			Интервал варьирования
натуральный	кодированный	-1	0	+1	
1	2	3	4	5	6
Суперпластификатор	X1 (A)	0,4	1,2	2,0	0,8
Ускоритель твердения	X2 (B)	1,0	2,5	4	1,5
Микрокремнезем	X3 (C)	10	20	30	10

Составлено автором

Исследования влияния комплекса модифицирующих добавок и наполнителя на кинетику твердения и предел прочности при сжатии и изгибе при растяжении выполнен на мелкозернистых бетонах, полученных из смесей со стандартной нормальной густотой цементного теста, имеющего расплыв конуса 106–115 мм. Дальнейшие испытания на прочность и расчеты производились в соответствии с действующей нормативной документацией. Для определения предела прочности при сжатии использовался пресс — ПИ-100-1-1-4, а для предела прочности при изгибе — машина МИИ-100.

Результаты

Контрольный состав мелкозернистого бетона без добавок обладал следующими свойствами и расчетными характеристиками: предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток —

[3] ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. М.: Стандартинформ. 2013. 11 с.

[4] ГОСТ Р 57345-2016. Бетон. Общие технические условия. М.: Стандартинформ. 2017. 79 с.

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

28,02 МПа; то же в возрасте 3 суток — 28,89 МПа; то же в возрасте 7 суток — 30,75 МПа; та же в возрасте 28 суток — 34,02 МПа; предел прочности при изгибе в возрасте 28 суток — 8,54 МПа; критерий оценки скорости набора прочности — 0,823.

Для проведения эксперимента был использован центральный композиционный план. План эксперимента в натуральных единицах измерения и его результаты приведены в таблице 2. Красным цветом в табл. 2 отмечены максимальные, желтым минимальные показатели.

Таблица 2

План и результаты проведения эксперимента

№ п/п	Факторы			Отклики					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
1	2,54	2,50	20	48,32	52,12	30,06	73,00	12,31	0,662
2	1,20	5,01	20	56,43	56,95	58,34	69,50	12,05	0,812
3	0,40	4,00	10	31,50	32,56	34,94	44,32	9,30	0,711
4	1,20	2,50	3,27	32,50	33,09	34,40	39,24	9,81	0,828
5	2,00	1,00	10	37,67	47,58	67,36	70,00	12,30	0,538
6	1,20	2,50	20	35,30	40,86	52,64	76,75	12,31	0,460
7	0,40	4,00	30	19,54	25,64	38,10	48,75	8,79	0,401
8	2,00	1,00	30	38,08	48,82	70,54	82,50	12,30	0,462
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
12	2,00	4,00	10	37,72	38,35	39,68	42,10	10,32	0,896
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
15	0,40	1,00	30	12,14	16,14	24,20	27,50	6,57	0,441

Составлено автором

В качестве значений функций отклика были приняты полученные в результате проведения эксперимента, следующие характеристики: Y1 — предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток, МПа; Y2 — то же, в возрасте 3 суток, МПа; Y3 — то же, в возрасте 7 суток, МПа; Y4 — то же, в возрасте 28 суток, МПа; Y5 — предел прочности при изгибе в возрасте 28 суток, МПа; Y6 — критерий оценки скорости набора прочности.

Из результатов, представленных в табл. 1 видно, что ряд составов характеризуется весьма высокими темпами и согласно действующим российским и европейским нормам относятся к быстротвердеющим.

Анализируя результаты исследований приведенных в таблице 2 можно констатировать следующее. Только один состав — № 15, из всех исследованных показал значения всех характеристик ниже, чем у контрольного состава, по прочностным характеристикам во всех исследованных возрастах, а также по скорости набора прочности. Для данного состава характерны наименьшие расходы химических добавок и наибольший расход микрокремнезема.

Максимальный предел прочности при сжатии в возрасте 2 и 3 суток показал состав № 2, она составила — 56,43 МПа, что в два раза превышает значения контрольного состава. Для данного состава использовались средние значения расхода суперпластификатора и микрокремнезема, однако расход добавки ускорителя твердения был максимальным.

Состав № 8, которому соответствует максимальный расходы суперпластификатора и микрокремнезема и минимальный расход ускорителя твердения показал наибольший предел прочности при сжатии в возрасте 7, 14 и 28 суток. Нормативный критерий оценки скорости набора прочности указывает на то, что бетон является быстротвердеющим, однако у данного состава он гораздо ниже, чем у лучшего и контрольного.

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

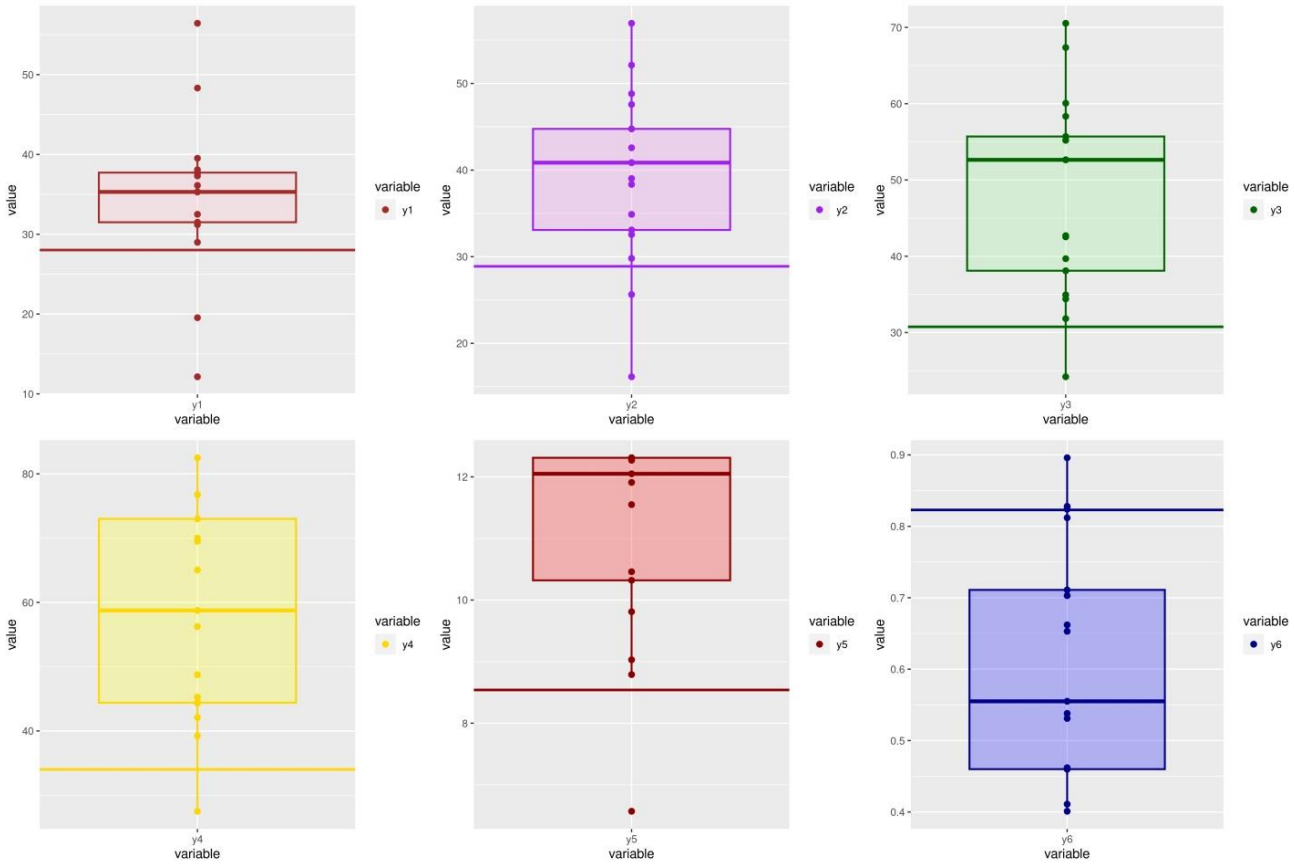

Рисунок 1. *Коробчатые диаграммы для пределов прочности при сжатии в возрасте 2, 3, 7 и 28 сут., предела прочности при изгибе в возрасте 28 сут. и критерия оценки скорости набора прочности (слева на право, сверху вниз, составлено автором)*

Диаграммы, приведенные на рис. 1 показывают распределение значений переменных и отражают пять параметров: минимальное значение, нижний квартиль, медиану, верхний квартиль и максимальное значение. Сплошной горизонтальной линией на диаграммах показано значение соответствующее величине полученной у контрольного состава. Наряду с этим, на диаграммах отображены вероятные выбросы — отдельно стоящие кружки, значения которых выходят за диапазон в ±1,5 межквартильного размаха, разности верхнего и нижнего квартилей. Первая диаграмма отражает распределение значений для предела прочности при сжатии в возрасте 2 суток. На диаграмме имеется четыре выброса, два в верхней части, для значений 56,43 и 48,32 МПа соответственно и в нижней для значений 12,14 и 19,54 МПа соответственно. Данные значения выходят за диапазон ±1,5 межквартильного размаха. Значения предела прочности при сжатии в возрасте 2 суток, за исключением двух нижних выбросов превышают значения, полученные у контрольного состава. Помимо этого, имеет место незначительный сдвиг распределения в отрицательную сторону (нижний «ус» немного длиннее верхнего). На диаграммах для пределов прочности при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток выбросы отсутствуют. Диаграммы для 3 и 28 суток в большей степени, чем для 2 суток также показывают сдвиг в отрицательную сторону.

Все диаграммы, представленные на рисунке 1, (исключая последнюю) показывают, что все результаты пределов прочности, за исключением одного-двух превышают показатель для контрольного состава. На диаграмме, показывающей распределение значений для предела прочности при изгибе в возрасте 28 суток, имеет место сильный сдвиг распределения в отрицательную сторону и выброс, который соответствует значению — 6,57 МПа.

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

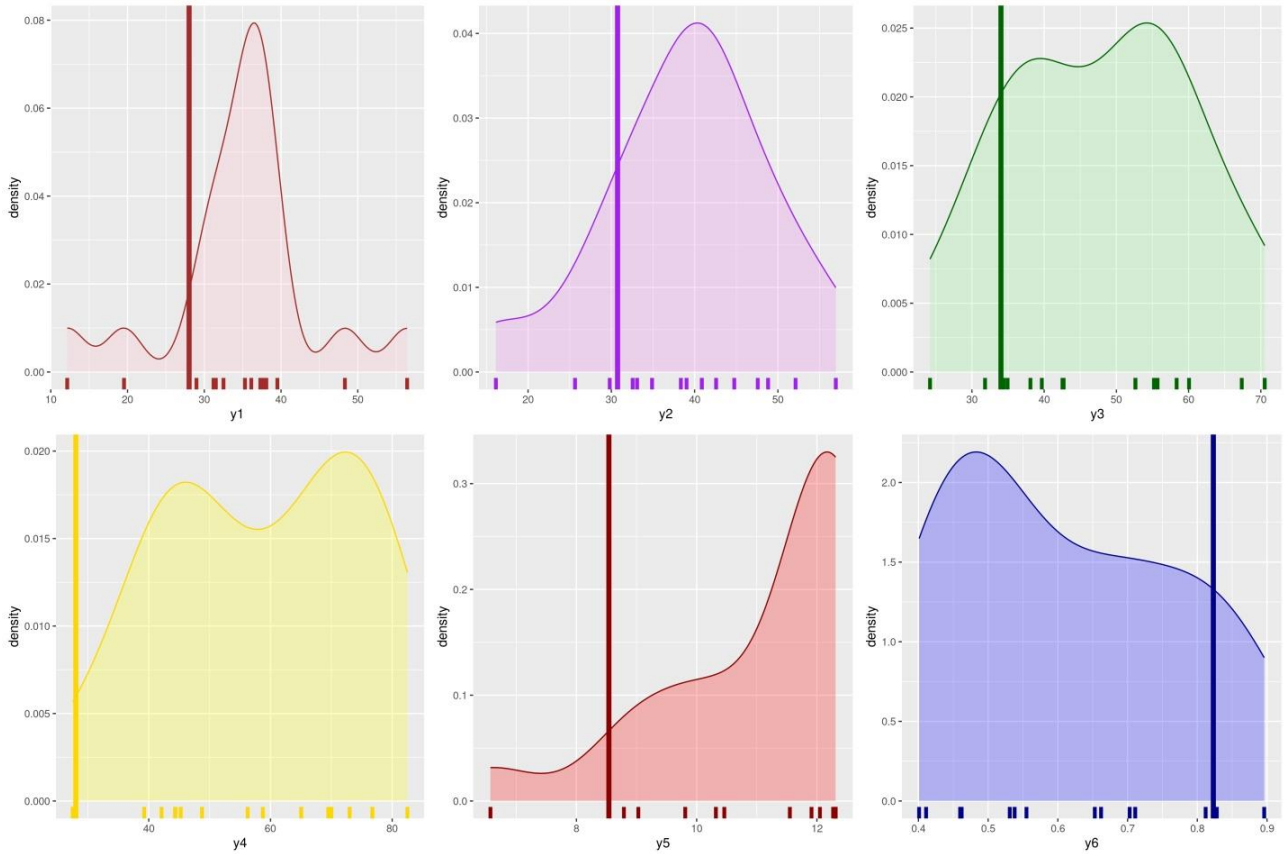

Рисунок 2. *Диаграммы ядерной функции плотности для пределов прочности при сжатии в возрасте 2, 3, 7 и 28 сут., предела прочности при изгибе в возрасте 28 сут. и критерия оценки скорости набора прочности (слева на право, сверху вниз, составлено автором)*

Диаграмма, отображающая критерий оценки скорости набора прочности показывает, что из всех исследованных составов только три имеют значения превышающие контрольного. Это позволяет утверждать, что вяжущее вещество, использованное в исследованиях можно отнести к группе алитовых. На диаграммах прочности при сжатии видно, что с течением времени происходит увеличение расстояния между верхним и нижним квартилями и в определенной степени между максимальными и минимальными значениями.

На рисунке 2 приведены диаграммы ядерной функции плотности для исследованных переменных отклика. В нижней части диаграмм, приведенных на рисунке 2, размещен график-щетка, который показывает реальные значения для каждой функции отклика, наложенные на прямую. Вертикальная линия, нанесенная на каждой диаграмме, соответствует значениям для контрольного состава мелкозернистого бетона. Диаграммы ядерной функции плотности для прочности в возрасте 2 и 3 суток весьма похожи на распределение Лапласа. Однако, с течением времени, а именно в возрасте 7 и еще более отчетливо в возрасте 28 суток распределение преобразуется в бимодальное со смещением в большую сторону, соответствующую максимальным значениям. Диаграмма ядерной функции плотности для предела прочности при изгибе имеет сильное смещение в сторону значений, соответствующих величине — 12 МПа. Диаграмма, отображающая критерий оценки скорости набора прочности, показывает, что рассчитанные значения сильно смещены влево, в сторону минимальных величин, а значений, превышающих контрольное всего четыре.

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Рисунок 3. *Корреляционная матрица исследованных показателей (составлено автором)*

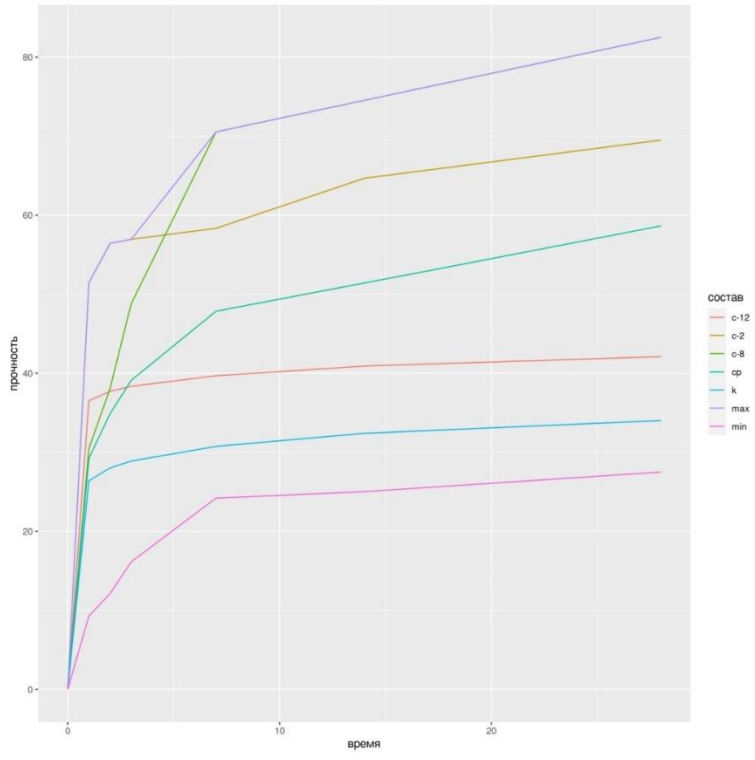

Рисунок 4. *График зависимости прочности при сжатии от сроков твердения мелкозернистого бетона, обозначения в тексте (составлено автором)*

Представим графически степень связи между исследованными переменными и функциями отклика с помощью матрицы корреляции. Из рисунка 3 видно, что высокую положительную силу связи имеет расход суперпластификатора и пределы прочности при

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

сжатии в возрасте 3 и 7 суток. Средняя положительная сила связи отмечена между расходом суперпластификатора и пределом прочности при сжатии в возрасте 2 суток, а также пределом прочности при изгибе в возрасте 28 суток. Слабая положительная связь отмечена между расходом суперпластификатора и пределом прочности при сжатии в возрасте 28 суток, расходом ускорителя твердения и пределом прочности при сжатии в возрасте 2 суток, а также критерием оценки скорости набора прочности. Для всех остальных случаев отмечена положительная или отрицательная очень слабая сила связи.

Из графика, приведенного на рисунке 4 следует, что в начальные сроки твердения — первые 3 суток наибольшее значение по прочности на сжатие показывает состав № 2 (с-2). В дальнейшем, к 7 суточному возрасту интенсивность набора прочности у этого состава снижается и лучшие показатели показывает состав № 8 (с-8). Состав № 12 (с-12) имеет наибольшее значение величины критерия оценки скорости набора прочности, что характеризуется «Г»-образной кривой. Набор прочности у этого состава после 3 суток твердения замедляется, а наклон линии графика к горизонтали подобен наклону у контрольного состава (к). Помимо этого, на графике приведены минимальные (min), максимальные (max) и средние значения (ср) для всех исследованных составов.

Оценим значимость факторов на основании графиков влияния. На рисунке 5 приведены гистограммы Парето, на которых отображены абсолютные значения влияния факторов и их взаимодействий. Красная контрольная линия на графиках указывает границу, которая соответствует табличному значению критерия Стьюдента. Факторы и взаимодействия, у которых рассчитанные значения критерия Стьюдента превышают табличные (т. е. пересекают линию) являются статистически значимыми.

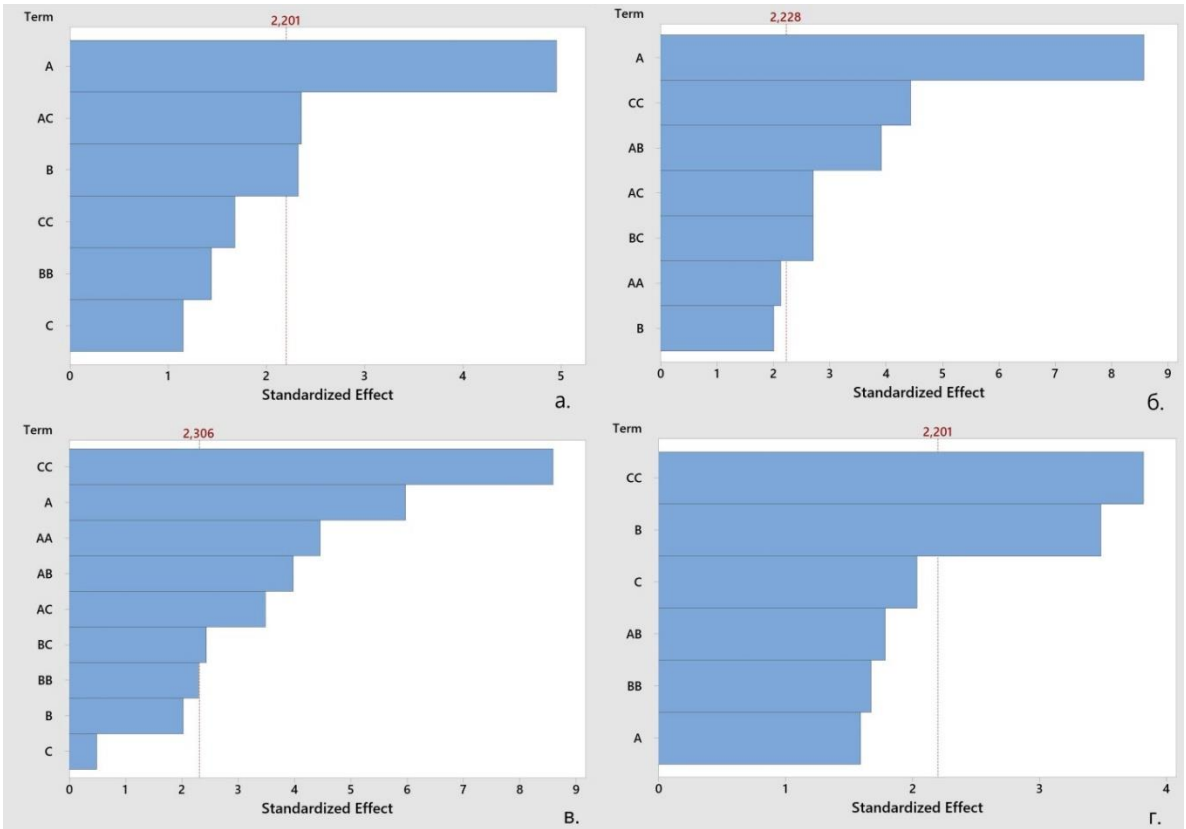

Рисунок 5. *Оценка влияния факторов по закону Парето: а — предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток; б — предел прочности при сжатии в возрасте 7 суток; в — предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток; г — критерий оценки скорости набора прочности (составлено автором)*

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Как следует из диаграмм, значимыми в 2 суточном возрасте являются расход суперпластификатора и ускорителя твердения, а также взаимодействие расхода суперпластификатора и микрокремнезема. Для 7 суточного возраста влияние расхода ускорителя твердения становится незначимым. Однако, значимым становится все взаимодействия, а также квадрат расхода микрокремнезема. В 28 суточном возрасте из всех возможных вариантов незначимыми являются только расходы ускорителя твердения и микрокремнезема. Для критерия оценки скорости набора прочности значимыми являются расход ускорителя твердения и квадрат расхода микрокремнезема.

Проверка воспроизводимости опытов с помощью критерия Кохрена показала, что $G_{max} < G_{кр}$, для критерия Фишера выполняется условие $F < F_{кр}$, следовательно, исследованные функции откликов однородны, а модели регрессии адекватны.

Обсуждение результатов

Полная модель регрессии для предела прочности при сжатии в возрасте 2 суток имеет вид:

$$R_2 = 31{,}18 - 1{,}93X1 - 2{,}26X2 + 0{,}14X3 + 0{,}88X2^2 - 0{,}02X3^2 + 0{,}52X1X3 + \varepsilon . \quad (1)$$

Для функции отклика предел прочности при сжатии в возрасте 7 суток модель имеет вид:

$$R_7 = 28{,}7 + 15{,}19X1 - 1{,}15X2 + 0{,}87X3 - 0{,}05X3^2 - 5{,}12X1X2 + 0{,}53X1X3 + 0{,}28X2X3 + \varepsilon . \quad (2)$$

Для функции отклика предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток:

$$R_{28} = 7{,}6 + 35{,}19X1 + 7{,}02X2 + 3{,}42X3 - 10{,}39X1^2 - 1{,}52X2^2 - 0{,}13X3^2 - \\ - 6{,}35X1X2 + 0{,}84X1X3 + 0{,}31X2X3 + \varepsilon . \quad (3)$$

Для функции отклика — критерий оценки скорости набора прочности:

$$R_{2/28} = 1{,}03 - 0{,}07X1 - 0{,}09X2 - 0{,}04X3 + 0{,}02X2^2 + 0{,}001X3^2 + 0{,}05X1X2 + \varepsilon . \quad (4)$$

где ε — отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых равна: 4,99 — для предела прочности при сжатии в возрасте 2 суток; 5,16 — в возрасте 7 суток; 5,42 — в возрасте 28 суток и 0,09 — для критерия оценки скорости набора прочности.

Оценку адекватности полученных моделей можно сделать на основании коэффициента детерминации — R^2. Для предела прочности в возрасте 2 суток он составляет 81,97 %, для 7 суточного возраста — 90,42 %, для 28 суток — 95,44 %, для критерия оценки скорости набора прочности — 80,70 %. Следовательно, характер связи для исследованных показателей можно оценить как сильный, и очень сильный.

На основании полученных уравнений построены совмещенные пространственные графики поверхностей для исследованных функций откликов.

На графике, приведенном на рисунке 6, для предела прочности, при сжатии мелкозернистого бетона исследованного состава, видно, что ее увеличение происходит в случае, когда увеличиваются расходы всех трех компонентов комплексной добавки. При этом следует отметить, что имеет место зона (оранжевого цвета), которая позволяет получить высокие значения предела прочности при сжатии, но не такие высокие, как в первом случае. Для этой зоны характерно, что расход ускорителя твердения соответствует его наименьшим значениям, при высоких расходах суперпластификатора и расходах микрокремнезема «стремящихся» к средним.

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

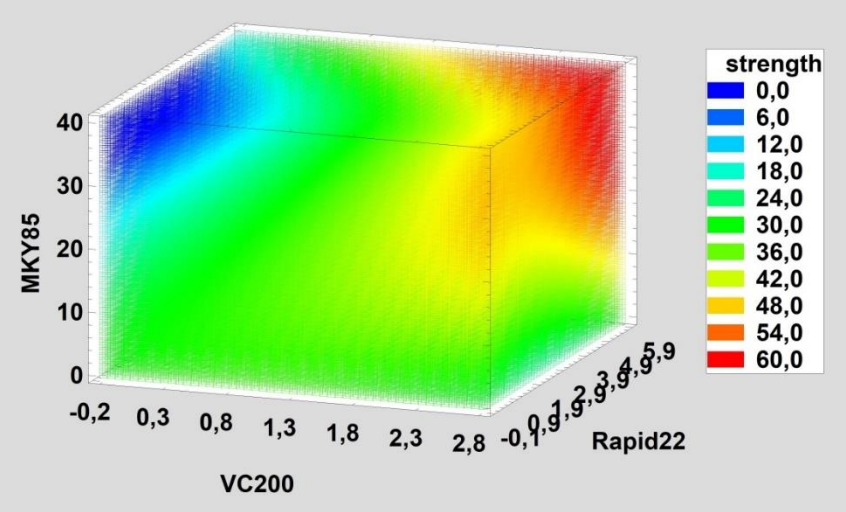

Рисунок 6. *Пространственная сетка поверхности отклика для 2 суток (составлено автором)*

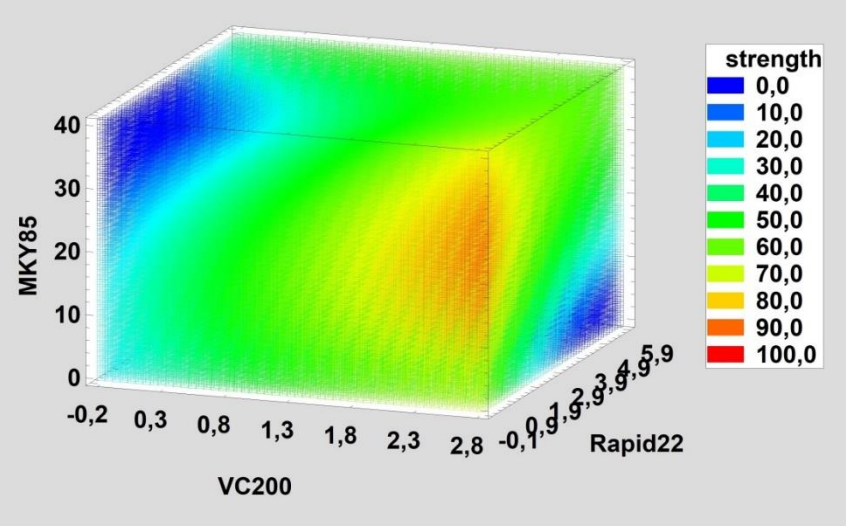

Рисунок 7. *Пространственная сетка поверхности отклика для 7 суток (составлено автором)*

В семисуточном возрасте (рис. 7) график претерпевает существенные изменения. Расход ускорителя твердения в больших дозировках практически не оказывает влияния на прочность при сжатии мелкозернистого бетона.

Высокие расходы ускорителя твердения и суперпластификатора, при низких расходах микрокремнезема приводят к значительной потере прочности при сжатии. Однако, в области минимальных расходов (до 1 %) ускоритель твердения положительно влияет на прочность при сжатии.

Основное влияние на увеличение предела прочности при сжатии оказывают — высокий расход суперпластификатора и расход микрокремнезема в интервале 15–30 %.

В нормативные сроки происходит окончательное формирование влияний расходов комплексной добавки на прочность при сжатии мелкозернистого бетона.

Как видно на графике, на рисунке 8 наибольшие значения прочности при сжатии формируются в области, которая характеризуется высокими расходами суперпластификатора, наименьшими расходами ускорителя твердения и средними расходами микрокремнезема. Области, которые имеют иные расходы компонентов комплексной добавки, ведут к снижению прочности.

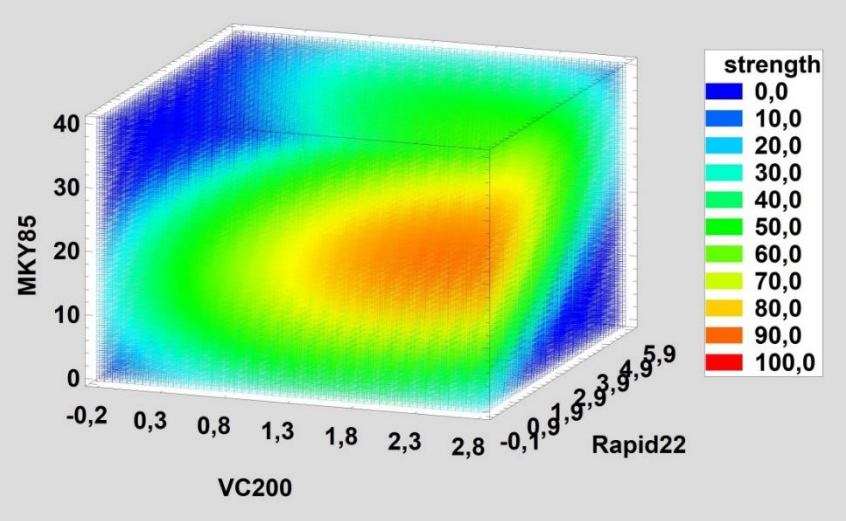

Рисунок 8. *Пространственная сетка поверхности отклика для 28 суток (составлено автором)*

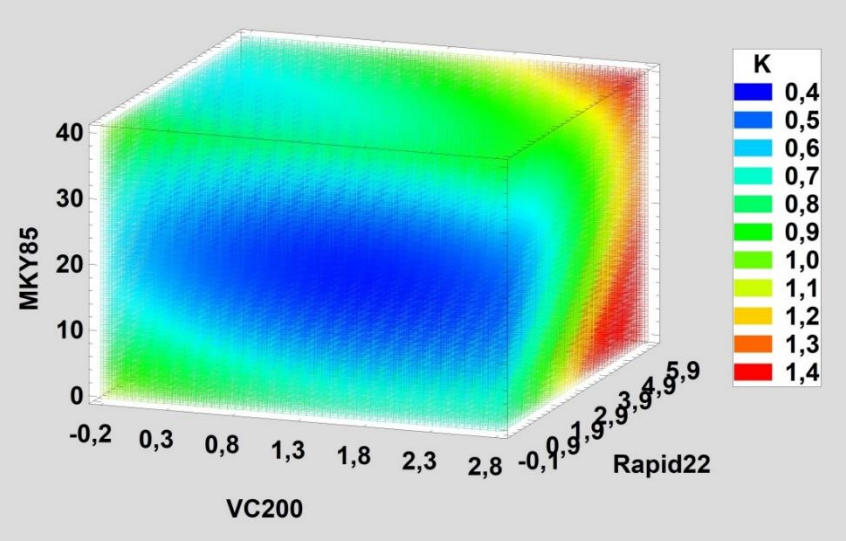

Рисунок 9. *Пространственная сетка поверхности отклика для коэффициента R2/R28 (составлено автором)*

График, отражающий влияние расхода компонентов на величину критерия оценки скорости набора прочности (рис. 9), имеет незначительное сходство с графиком, отражающим влияние расхода компонентов комплексной добавки на предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток (рис. 6). Оно заключается в том, что оба этих показателя достаточно высоки при условии, при котором расход компонентов комплексной добавки также высок. Тем не менее, более темные области высоких значений критерия оценки скорости набора прочности располагаются в области, где расход микрокремнезема меньше средних и стремится к минимальным показателям. Как следствие, наибольшие прочностные показатели мелкозернистого бетона в возрасте 7 и 28 суток соответствуют минимальным показателям критерия оценки набора прочности.

Выводы

В соответствии с целью работы определим составы комплексной модифицирующей добавки, позволяющие получить максимальную прочность в возрасте 2 суток и максимальное значение критерия оценки скорости набора прочности. Для предела прочности при сжатии в

65SAVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

возрасте 2 суток таким составом является состав № 2. Комплексная добавка, для этого состава состояла из суперпластификатора — 1,2 %, ускорителя твердения — 5,01 % и микрокремнезема — 20 %. Этот состав показал предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток — 56,95 МПа, что практически в два раза превышает прочность контрольного состава. Показатель критерия оценки скорости набора прочности данного состава составляет — 0,812, что ниже, чем у контрольного состава — 0,823. Наилучшим составом, показавшим наибольший критерий оценки скорости набора прочности, является состав № 12. Комплексная добавка для данного состава содержала в себе суперпластификатора — 2,0 %, ускорителя твердения — 4,0 % и микрокремнезема — 10 %. Данный состав имеет критерий оценки скорости набора прочности — 0,896, что почти на 9 % превышает значение у контрольного состава. Предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток у этого состава составляет — 37,72 МПа, что превышает значение контрольного, однако ниже, чем у лучшего в исследованиях на 33,15 %.

Имея в своем распоряжении уравнения регрессии, для предела прочности при сжатии и критерия оценки скорости набора прочности появляется возможность решить дилемму их оптимизации, используя для этого функцию желательности. Проведенная по двум этим параметрам оптимизация показала, что расход компонентов комплексной добавки, содержащей в своем составе — суперпластификатор — 2,5 %, ускоритель твердения — 4,95 % и микрокремнезем — 36,33 % позволит получить предел прочности при сжатии 61,82 МПа, при величине критерия оценки скорости набора прочности близкой к 1.

Проведена оптимизация расхода компонентов комплексной добавки с целью одновременно получить максимальный предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток и максимальное значение критерия оценки скорости набора прочности. В этом случае расход компонентов должен быть следующим: суперпластификатор — 2,50 %; ускоритель твердения — 4,95 % и микрокремнезема — 36,33 %. При этих расходах возможно получить предел прочности при сжатии — 61,82 МПа и коэффициент критерия оценки скорости набора прочности близкий к единице.

Совместное применение микрокремнезема, суперпластификатора и ускорителя твердения позволяет получать быстротвердеющие бетоны с высокими показателями ранней прочности и критерием оценки скорости набора прочности. Микрокремнезем является эффективным ускорителем гидротации и твердения цемента.

Применение комплексной органоминеральной добавки, содержащей в своем составе суперпластификатор, ускоритель твердения и микрокремнезем позволяет получить мелкозернистый бетон, обладающий повышенной скоростью набора прочности в ранние сроки твердения и высоким уровнем прочности при сжатии, соответствующий по своим свойствам быстротвердеющим мелкозернистым бетонам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Несветаев Г.В. Прогноз кинетики прочности бетона при твердении в условиях, отличных от нормальных / Г.В. Несветаев, Ю.И. Корянова // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. Т. 2. № 4. 2023. С. 59–68.
2. 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(58). 2020. С. 39–46.

3. Ильясов А.Г. Ускорители схватывания и твердения портландцемента на основе оксидов и гидроксидов алюминия / А.Г. Ильясов, И.Н. Медведева, В.И. Корнеев // Металлург. № 12. 2008. С. 73–77.

4. Васильев А.С. Эффективность добавок-ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона / А.С. Васильев, Ю.Г. Барабанщиков // Инженерно-строительный журнал. № 12. 2012. С. 72–78.

5. Тейлор Х. Химия цемента / Х. Тейлор. Пер. с англ. — М.: Мир, 1996. — 560 с.

6. Тараканов О.В. Влияние органоминеральных добавок на формирование микроструктуры и кинетику твердения бетона при отрицательных температурах / О.В. Тараканов, Ю.Г. Иващенко, И.В. Ерофеева // Региональная архитектура и строительство. № 3(56). 2023. С. 91–102.

7. 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. С. 1–19. http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7392.

8. 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. Вып. 1(90). 2023. С. 114–128.

9. Пименов С.И. Влияние минералогического состава цемента при его активации на физико-технические свойства бетона / С.И. Пименов, Р.А. Ибрагимов // Строительные материалы. № 8. 2017. С. 64–67.

10. Carballosa P. Influece of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements / P. Carballosa, J.L. Garcia Calvo, D. Revuelta, J.J. Sanchez, J.P. Gutierrez // Construction and Building Materials. Vol. 93. 2015. Pp. 223–229. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.113.

11. Красиникова Н.М. Структурообразование цементного камня с полифункциональной добавкой / Н.М. Красиникова, Р.Р. Кашапов, Н.М. Морозов, В.Г. Хозин // Строительные материалы. № 5. 2016. С. 66–69.

12. Yu W.L. Study on application of fiber-reinforced concrete in sluice gates / W.L. Yu, W.C. Shih // Construction and Building Materials. Vol. 176. 2018. Pp. 737–746. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.004.

13. Воронин В.В. Применение добавок для ускорения набора прочности как альтернатива тепловлажностной обработке бетона / В.В. Воронин, Е.А. Шувалова, А.А. Одинцов, Е.А. Архангельский // Транспортные сооружения. № 2. 2018. С. 1–7.

14. Кононова О.В. Интенсификация твердения пластифицированного бетона с добавкой доменного гранулированного шлака / О.В. Кононова, Ю.А. Минаков, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов, А.О. Смирнов, Н.В. Губин // Современные наукоемкие технологии. № 9-2. 2016. С. 228–232.

Sokolov Petr Eduardovich
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
E-mail: pr7391@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3960-5010
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439730

Results of the research of a complex additive influence on strength gaining rate and on fine concrete strength itself

Abstract. In the article there have been given the results of influence of complex modifying additive on strength gaining rate and on fine concrete strength itself. There has been made an assessment of one of the methods of increasing initial strength of fine concrete and that of strength gaining rate thanks to complex organic-mineral additive applied. Components included into the complex additive composition, made it possible to increase growth rate and level of strength, which in its turn promotes reducing energy expenditure within the production process and improving basic properties of concrete and ferroconcrete items. To carry out the research a central composite design was applied, which enabled to establish complex modifying additive components optimal consumption to make it possible to have the fastest strength gaining rate in the earliest hardening time. A preliminary analysis of the research results has been carried out by the author and there have been acquired their descriptive statistics which are presented in the article as diagrams and charts. The analysis of the research results enabled to obtain the regression equations and establish the influence degree of the complex additive components on strength gaining rate and fine concrete strength itself. The regression equations obtained by the author made it possible to build superposed spatial graphs of surfaces for the response functions researched. There has been carried out an optimization of modified fine concrete and established the composition of the complex additive, enabling to get a high strength gaining rate and strength of fine concrete in the earliest hardening time with desirability function applied. There have been developed effective compositions of fast-hardening fine concretes modified with an organic-mineral additive. Within the research standard procedures of estimation of strength gaining rate and strength of concrete were applied.

Keywords: fine concrete; complex additive; strength gaining rate; super-plasticizer; accelerant; micro-silica