



ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2023_3_8
MPHTI 67.09.33

**И.Е. Абдраимов¹, Б.Т. Копжасаров¹, Д.А. Ахметов², А.К. Алдунгарова³,
А.Е. Кисабаева²**

¹Южно-Казахстанский университет имени М. Ауезова, г. Шымкент, Казахстан
E-mail: sarkul_ilyas@mail.ru

E-mail: kopzhasarov.bakhadyr@bk.ru

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

E-mail: d.a.akhmetov@satbayev.university

³Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: liya_1479@mail.ru.

*E-mail: a.kissabayeva@satbayev.university**

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК И МИКРОКРЕМНЕЗЕМА НА КИНЕТИКУ НАБОРА ПРОЧНОСТИ БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИХ БЕТОНОВ (БТБ)

EFFECT OF MODIFYING CHEMICAL ADDITIVES AND MICROSILICA ON THE STRENGTH GAIN KINETICS OF FHC

ӨЗГЕРТЕТІН ХИМИЯЛЫҚ ҚОСПАЛАР МЕН МИКРО КРЕМНИЙ ДИОКСИДІНІҢ ТЕЗ ҚАТАТЫН БЕТОННЫҢ (ТҚБ) БЕРІКТІК ЖИЫНТЫҒЫНЫҢ КИНЕТИКАСЫНА ӨСЕРІ

Аннотация. В статье приводятся результаты проведенных исследований возможности ускорения кинетики набора прочности тяжелого бетона с применением современных модификаторов. Был разработан базовый состав быстротвердеющего бетона (БТБ) класса по средней прочности В25. Для ускорения твердения БТБ были проанализированы известные методы и подходы. На основании анализа ранее проведенных исследований других авторов были выбраны модификаторы: микрокремнезем и химическая добавка – гиперпластификатор 2 поколения на основе эфиров поликарбоксилатов, после чего была принята рабочая гипотеза, заключающаяся в поиске оптимального и эффективного сочетания этих компонентов в составе бетона. В ходе экспериментов путем моделирования показателей средней прочности образцов в ранние сроки твердения выведено оптимальное количество химической добавки для получения высококачественного БТБ. Результаты испытаний показали реальную возможность ускорения твердения БТБ на 50 % в возрасте 2 суток, положительный эффект ускорения кинетики набора прочности и возможность экономии вяжущего вещества (цемента) до 20 % при применении микрокремнезема.

Ключевые слова: бетон, анализ, микрокремнезем, ускорение твердения, исследование.

Аңдатпа. Мақалада заманауи модификаторларды қолдана отырып, ауыр бетонның беріктігін алу мерзімін жеделдету мүмкіндігі туралы жүргізілген зерттеулердің нәтижелері келтірілген. В25 орташа беріктігі бойынша жылдам қататын бетонның (ТҚБ) негізгі құрамы әзірленді. Әрі қарай, ТҚБ қатаюын жеделдету үшін белгілі әдістер мен тәсілдер талданды. 2 негізгі модификатор таңдалды және поликарбоксилат эфирлеріне негізделген микрокремнезем мен 2-ші буын гиперпластификаторының оңтайлы және тиімді комбинациясын іздеуде экспериментті

математикалық жоспарлау әдісін қолданудан тұратын жұмыс гипотезасы қабылданды. Эксперименттер барысында үлгілердің орташа беріктік көрсеткіштерін модельдеу арқылы қатаюдың ерте кезеңдерінде жоғары сапалы ТҚБ алу үшін химиялық қоспаның оңтайлы мөлшері шығарылды. Сынақ нәтижелері 2 тәулік жасында ТҚБ қатаюын 50 %-ға жеделдетудің нақты мүмкіндігін, беріктік жиынтығының кинетикасын жеделдетудің оң әсерін және микрокремнеземді қолдану кезінде тұтқыр затты (цементті) 20 %-ға дейін үнемдеу мүмкіндігін көрсетті.

Түйін сөздер: бетон, талдау, микрокремний, қатаю үдеуі, зерттеу.

Abstract. The article presents the results of studies of the possibility of accelerating the strength gain period of heavy concrete with the use of modern modifiers. The basic composition of fast-hardening concrete (FHB) of the class of average strength B25 was developed. Further, known methods and approaches were analyzed to accelerate hardening of BTB. Two main modifiers were chosen and a working hypothesis was adopted, which was to apply the method of mathematical planning of experiments in the search for an optimal and effective combination of microsilica and hyperplasticizer of the 2nd generation based on polycarboxylate esters. In the course of experiments by modeling the average strength values of samples in the early periods of hardening the optimum amount of chemical additive for obtaining high-quality bTB was deduced. The test results showed a real possibility of accelerating the hardening of BTB by 50% at the age of 2 days, a positive effect of accelerating the kinetics of strength gain and the possibility of saving the binder (cement) up to 20% when using microsilica.

Keywords: concrete, analysis, microsilica, hardening acceleration, research.

Введение. Современное строительство требует ускоренного набора прочности при твердении бетона, особенно в монолитном строительстве [1]. Эта техническая задача диктуется прежде всего экономической необходимостью. Ведь быстрое достижение проектной прочности монолитных конструкций необходимо для повышения оборачиваемости форм и опалубки, более эффективного использования строительного оборудования и повышения производительности строительных работ. Один из способов достижения такого темпа строительства может быть обеспечен использованием бетонов с ускоренным набором прочности [2]. В монолитном домостроении основным экономическим показателем является сокращение времени на возведение одного этажа до 3-х дней. Такой быстрый темп строительства классически может быть обеспечен [3,4]:

- строительными работами, производящимися компетентными специализированными бригадами;
- применением поточного метода строительства;
- проведением предварительного обучения рабочих технологиям и методам ведения строительных работ;
- обязательным использованием инновационных технологий, например, с применением быстротвердеющего бетона (БТВ).

Сократить время набора прочности бетона можно с применением определенных технологических приемов, ускоряющих процессы гидратации цемента [5]. К примеру, при невысоких водоцементных (В/Ц) отношениях в коллоидной цементной системе быстро создается перенасыщение водной среды продуктами гидратации минералов клинкера. Особенно эффективно нарастание прочности в бетонных смесях с невысокими (В/Ц) отношениями, где все процессы проходят в тонких пленках цементного теста. Применение активных минеральных добавок существенно влияет на основные физико-технические свойства бетона, придавая ему улучшенные характеристики: способствуют более эффективному использованию химической энергии клинкера за счет нарастания процессов кристаллизации [24]. Увеличивается количество низкоосновных гидросиликатов кальция за счет сокращения наиболее нестабильного компонента цементного камня – кристаллов гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что необходимо для получения однородного и долговечного бетона [26].

Исследование процессов образования структуры многокомпонентных цементных

систем показывает, что активность минеральных добавок характеризуется их способностью как к химическому, так и физико-химическому воздействию на процессы гидратации цемента. Ранее проведенными исследованиями установлено, что химическая активность микрокремнезема идет через этап гидратообразования с коллоидацией кремнеземных частиц и приводит к улучшению структуры цементной системы композита [9].

Практический опыт авторов данного исследования, полученный на строительных объектах, и систематические наблюдения за набором прочности бетона в монолитном домостроении показывают, что важно не только получить бетон с высокими характеристиками, но и сохранить их в течение периода эксплуатации.

Для получения высокопрочных быстротвердеющих бетонов (БТБ) предлагается способ снижения размера пор за счет введения ультрадисперсного активного кремнезема – отхода производства ферросилиция [10]. Также интерес с точки зрения ускорения твердения бетона представляет применение добавок-гиперпластификаторов на основе поликарбоксилатов. Чтобы обеспечить быстрое твердение бетона, необходимо применить добавку на основе поликарбоксилатов, молекулы которых оставляют свободной часть поверхности цемента, обеспечивая свободный доступ воды к цементному зерну и способствуя ускоренной гидратации цемента [7]. В этом случае можно попытаться, увеличивая одновременно количество добавки-гиперпластификатора на основе поликарбоксилатов и количество цемента, за счет снижения В/Ц отношения и ускорения процессов гидратации обеспечить высокую кинетику набора прочности [25].

По нашему мнению, преимущества получения высококачественных модифицированных БТБ заключаются:

- в высоких технологических свойствах бетонных смесей, получаемых путем снижения их водосодержания, повышения однородности системы и стойкости к расслоению путем применения модификаторов;

- ускорении темпов гидратации цемента (особенно С3S) на ранней стадии твердения, что сокращает сроки строительства, при этом обеспечивая его высокое качество [8];

- применении эффективных добавок-гиперпластификаторов, позволяющих добиваться низких В/Ц отношений бетонной смеси и высоких темпов набора прочности без снижения эксплуатационных свойств [24].

Цель настоящего исследования заключалась в поиске лучшего состава быстротвердеющего бетона БТБ с высокими эксплуатационными свойствами.

Для достижения поставленной цели было определено несколько путей решения:

- расчет составов БТБ с использованием модификатора-микрокремнезема и лабораторная проверка их характеристик по набору прочности [15];

- снижение В/Ц отношения согласно закона прочности бетона путем применения высоководоредуцирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата [6].

- оценка кинетики набора прочности и сравнение с контрольным составом.

Методы и материалы. Теоретическое исследование было направлено на расчет составов БТБ с помощью «уравнения абсолютных объемов» и определением направления работ на ускорение твердения бетона в ранние сроки, сравнение прочностных характеристик полученных составов с увеличенным количеством цемента, добавлением микрокремнезема и химической добавки на основе поликарбоксилатов. Прикладные исследования были направлены на экспериментальное подтверждение теоретических методов.

Далее проводились исследования физико-механических и эксплуатационных свойств, полученных модифицированных БТБ. Исследования проводились в 5 этапов, каждый из которых был нацелен на решение конкретной задачи:

- Выбор базовых материалов для проведения исследования согласно нормативным

документам на эти материалы;

- Расчет и подбор контрольного состава тяжелого БТБ;
- Подбор состава тяжелого бетона с увеличенным количеством цемента и применением гиперпластификатора на основе поликарбоксилата;
- Подбор состава бетона с микрокремнеземом согласно [15] и сравнение вышеприведенных составов по кинетике набора прочности на сжатие в ранние сроки твердения в возрасте 2 и 7 суток;
- Анализ и обобщение результатов испытаний модифицированного БТБ.

В качестве сырьевого материала использовали портландцемент СЕМ I 52,5 Н завода «Standart Cement» с характеристиками, представленными в табл. 1. В табл. 2 приводится химический состав СЕМ I 52.5 Н.

Таблица 1. Характеристики цемента

Марка цемента	Производитель	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	Начало схватывания не ранее, мин	Расход на 1 м ³ тяжелого бетона, кг
СЕМ I 52.5 Н *	Standart Cement, ТОО (Shymkent, Kazakhstan)	60,5	100	350-450

* В [21] приводится следующая расшифровка СЕМ I 52.5 Н: I – обозначает первый тип по содержанию гипса (в пересчете на SO₃), которое должно быть не ниже 1.5% и не выше 3.5-4.0% (для высокопрочных бездобавочных цементов); 52.5 – обозначает класс по прочности, соответствующий минимальному нормативному значению прочности на сжатие; Н – обозначает класс с обычной прочностью в раннем возрасте.

Таблица 2. Химический состав цемента СЕМ I 52,5 Н, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Прочие примеси
21,20	4,85	4,81	63,73	3,03	0,77	0,82	0,46	0,38

Для подтверждения соответствия выбранного вяжущего нормам и требованиям [21] был проведен ряд испытаний. Приведенные методики позволяют определить следующие параметры:

1) тонкость помола: исследуемое вяжущее показало тонкость помола 93,9 %.

2) нормальная густота и время схватывания цементного теста: исследуемое вяжущее вещество показало нормальную густоту 27,10 %. Начало схватывания наступило через 2 часа 09 мин, конец схватывания наступил через 4 часа 12 минут с момента затворения. Полученные показатели соответствуют [21].

Для проведения испытаний был использован песок производителя ТОО «Марк» (Алматинская обл., Казахстан). Данный заполнитель соответствует требованиям стандарта. В табл. 3 представлены характеристики используемого мелкого заполнителя (песка).

Таблица 3. Характеристики песка

Группа песка	Производитель	Модуль крупности	Полный остаток на сите № 063, %	Количество пылевидных и глинистых, %	Расход на 1 м ³ тяжелого бетона, кг
Средний	Марк, ТОО (Almaty, Kazakhstan)	2,5	61,2	1,04	800-1050

Для получения удовлетворительных характеристик бетонной смеси и конечного конгломерата быстротвердеющего бетона необходимо использовать песок, количество пылевидных включений в котором не превышает 1,5 %. Содержание пылевидных и глинистых включений в исследуемом песке составляло 1,04 %. Модуль крупности исследуемого песка – 2,5. Данные показатели являются приемлемыми для использования исследуемого заполнителя в тяжелых бетонах согласно [15].

Для крупного заполнителя (щебень и гравий) тяжелого бетона, с целью получения удовлетворительных характеристик бетонной смеси, полные остатки на контрольных ситах при расसेве фракций 5-10 мм, 10-15 мм, 10-20 мм, 15-20 мм, 20-40 мм, 40-80 мм и смеси фракций 5-20 мм должны соответствовать указанным в табл. 4, где d и D – наименьшие и наибольшие номинальные размеры зерен в мм.

Таблица 4. Рекомендуемые показатели рассева крупного заполнителя*

Диаметр отверстий контрольных сит, мм	Полные остатки на ситах, % по массе
d	от 90 до 100
$0.5(d+D)$	от 30 до 60
D	до 10
$1.25D$	до 0.5

* Для щебня и гравия фракций 5-10 мм и смеси фракций 5-20 мм применяют дополнительно нижние сита 2,5 мм (или 1,25 мм), полный остаток на которых должен быть от 95 % до 100 %. По согласованию изготовителя с потребителем допускается изготавливать щебень и гравий с полным остатком на сите $0,5(d+D)$ от 30 % до 80 % по массе.

В качестве крупного заполнителя был принят щебень фракций 5-10 мм и 10-20 мм производства ТОО «Арна» (Алматы, Казахстан). В табл. 5 представлены характеристики используемого крупного заполнителя (щебня).

Таблица 5. Характеристики крупного заполнителя

Размеры фракции, мм	Производитель	Полные остатки на ситах $0,5(d+D)$, % (норме 30-60)	Полные остатки на сите $1,25 D$, % (норма не более 0,5)	Расход на 1 м^3 тяжелого бетона, кг
5-10	ТОО Арна (Almaty, Kazakhstan)	57,41	0,37	200-450
10-20		59,65	0,42	450-750

В табл. 6 представлены характеристики модифицирующей добавки (микрокремнезема), принятого согласно [14].

Таблица 6. Характеристики микрокремнезема

Марка	Производитель	Массовая доля активного SiO_2 , % по массе, не менее 95	Расход на 1 м^3 тяжелого бетона, кг
МКУ-95	ТОО «Тау-Кен Темир» г. Караганда, РК	96,85	до 50

Микрокремнезем содержит частицы сферической формы диаметром 0,1 мкм и удельной поверхностью 15-25 м²/г и выше. Насыпная плотность находится в диапазоне от 150 до 250 кг/м³. По химическому составу микрокремнезем представлен в основном аморфным кремнеземом, содержание которого обычно превышает 85 % и достигает 97 %. Микрокремнезем имеет удельную поверхность равную 3980 см²/г по данным ТОО «Тау Кен Темир» (Karaganda, Kazakhstan).

В табл. 7 приводится химический состав микрокремнезема.

Таблица 7. Химический состав микрокремнезема МКУ-95, %

SiO ₂	C	Влага	Al ₂ O ₃	CaO	pH	ρ, г/см ³	п.п.п.
96,87	1,33	1,08	0,24	0,47	7,89	0,44	1,66

Из химического состава, представленного производителем при сравнении с нормами качества микрокремнезема [14], следует, что содержание оксидов в составе микрокремнезема является достаточным для получения результатов в поставленных задачах.

В табл. 8 представлены характеристики химической добавки (гиперпластификатора поликарбоксилатного 2-го поколения).

Таблица 8. Характеристики химической добавки

Марка	Производитель	Критерий эффективности добавки	Расход на 1 м ³ тяжелого бетона, кг
AR Premium	ТОО «ARPG», г. Астана, РК	от П1 до П5	от 4 до 8

Эффективность действия добавок, регулирующих кинетику твердения бетонов и растворов, оценивалась согласно [22] по изменению их прочности (ΔR_t , %) в основных составах по сравнению с контрольным в сроки твердения 1 и 28 суток по формуле (1).

$$\Delta R_t = \left(\frac{R_t^{\text{контр}} - R_t^{\text{осн}}}{R_t^{\text{контр}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $R_t^{\text{осн}}$ и $R_t^{\text{контр}}$ – прочность бетонов или растворов основных и контрольного составов в сроки твердения t , МПа.

Структура дальнейших исследований была направлена на расчет состава БТБ на портландцементе для первых пробных замесов и утверждения контрольного состава. Следом производилось экспериментальное подтверждение улучшения показателей по прочности на сжатие [1] в ранние сроки твердения (2 и 7 суток) контрольного состава БТБ после его модифицирования ускорителем твердения, предложенным в теоретических исследованиях [7]. Ниже приводится последовательность проведенных испытаний.

Расчет и подбор состава БТБ. При подборе состава БТБ на портландцементе для пробных замесов используется формула из [15], которая устанавливает прочность бетона через 1 сутки твердения в нормальных условиях:

$$R_{B1} = 0,65 R_{ц1} * (Ц/В - 1,3), \quad (1)$$

где: $R_{ц1}$ – прочность цемента при сжатии через 1 сут, МПа

На основе состава бетона, полученного расчетами, проводился подбор состава модифицированного БТБ с различным содержанием вяжущего, микрокремнезема и химической добавки. Сводные данные по характеристикам этих составов бетона отражены

в табл. 9, 10: в табл. 9 приведены прочностные характеристики в ранние сроки твердения БТБ контрольного состава на чистом цементе и составы с различным содержанием микрокремнезема в составе вяжущего, в табл. 10 приведены прочностные характеристики в ранние сроки твердения БТБ контрольного состава на цементе и составы с увеличенным содержанием цемента и гиперпластификатора 2-поколения с направленными свойствами AR Premium АН в качестве химической добавки.

Таблица 9. Состав БТБ с заменой части цемента микрокремнеземом

В/Ц	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Щебень, 5-10мм, кг/м ³	Щебень, 10-20 мм, кг/м ³	Добавка, кг/м ³	Микрокремнезем, кг/м ³	Прочность, 2 сут.		Прочность, 7 сут.	
							МПа	%	МПа	%
0,35	360	965	292	670	5,9	50	22,35	68,3	41,35	126,4
0,35	370	965	292	670	5,9	40	20,9	63,9	37,0	113,2
0,36	380	965	292	670	5,9	30	21,8	66,6	40,2	122,9
0,36	390	965	292	670	5,9	20	20,3	62,0	35,25	107,6
0,37	400	965	292	670	5,9	10	19,0	58,1	34,1	104,3
0,37	400	965	292	670	5,9	-	17,7	54,1	33,5	102,4

Примечание. За 100 % принят показатель средней прочности на сжатие бетона класса В25, равный 32,7 МПа.

Таблица 10. Состав БТБ с разным содержанием цемента и количеством химической добавки

В/Ц	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Щебень, 5-10 мм, кг/м ³	Щебень, 10-20 мм, кг/м ³	Добавка, кг/м ³	Прочность, 2 сут.		Прочность, 7 сут.	
						МПа	%	МПа	%
0,28	450	965	292	670	7,0	33,05	101	54,6	167,0
0,35	450	965	292	670	5,9	18,07	55,26	41,05	125,5
0,29	440	965	292	670	6,8	31,03	94,89	53,2	162,7
0,35	440	965	292	670	5,9	18,05	55,2	40,95	125,2
0,35	400	965	292	670	6,0	18,55	56,7	41,75	127,6
0,34	410	965	292	670	6,2	22,85	69,87	43,7	133,6
0,33	420	965	292	670	6,4	25,25	77,2	44,95	137,4
0,31	430	965	292	670	6,6	27,35	83,64	47,6	145,6
0,37	400	965	292	670	5,9	17,7	54,1	33,5	102,4
0,35	420	965	292	670	5,9	17,96	54,9	40,55	124,0
0,36	410	965	292	670	5,9	17,85	54,6	40,5	123,9
0,35	430	965	292	670	5,9	17,91	54,77	40,6	124,2
0,27	460	965	292	670	7,1	34,1	104,2	55,25	169,0

0,34	460	965	292	670	5,9	18,15	55,5	41,14	125,8
------	-----	-----	-----	-----	-----	-------	------	-------	-------

Далее составы бетона экспериментально подтверждались в ходе лабораторных замесов, после чего изготавливались контрольные образцы бетона, которые подвергались испытаниям.

Определение основных прочностных характеристик на сжатие.

В рамках проведения испытания на сжатие производилась формовка образцов в формах 2ФК 100 из смеси контрольного состава и далее из каждого последующего испытуемого состава.

Прочность бетона на сжатие вычислялась с точностью до 0,01 МПа по формуле (2).

$$R = \alpha \frac{F}{A} K_w, \quad (2)$$

где: F – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь рабочего сечения образца, мм²; α – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы; K_w – поправочный коэффициент для ячеистого бетона, учитывающий влажность образцов в момент испытания (не применяется для тяжелых, мелкозернистых и СУБ).

Результаты и обсуждение. Из табл. 9, отражающей составы БТБ с применением микрокремнезема, видно, что замена до 12 % цемента реакционно-активным микрокремнеземом МКУ-95 повышает набор прочности в возрасте 2 сут на 14 %, а в возрасте 7 сут до 24 % по сравнению с контрольным составом. На рис. 1 представлено влияние микрокремнезема (МКУ) на кинетику набора прочности БТБ в ранние сроки твердения.

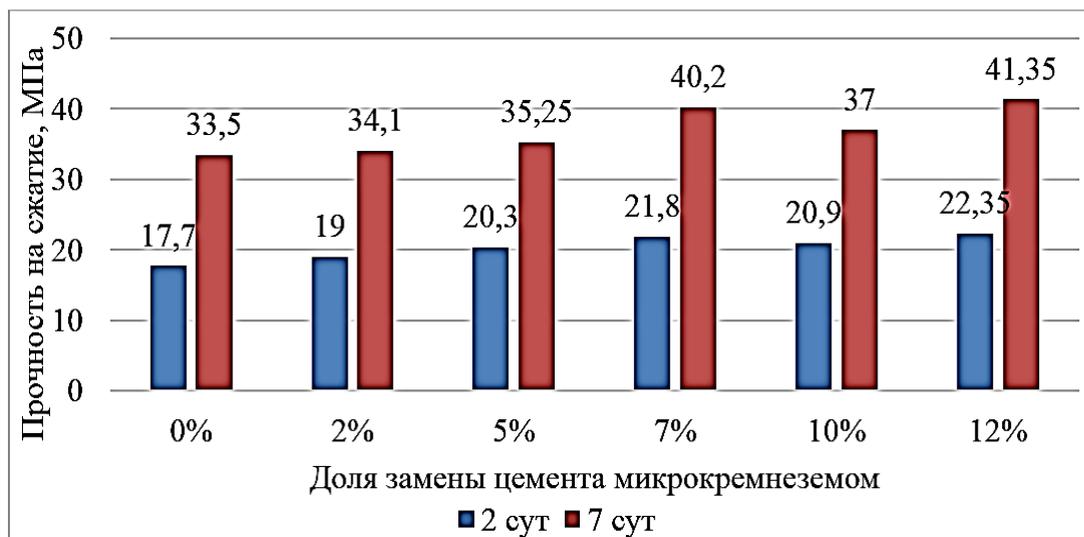


Рисунок 1. Влияние микрокремнезема (МКУ-95) на кинетику набора прочности БТБ в ранние сроки твердения

Из табл. 10, показывающей зависимость набора прочности от количества цемента, видно следующее:

- 1) увеличение количества цемента до 15 % без увеличения количества гиперпластификатора показывает увеличение набора в возрасте 2 суток всего на 1 %.
- 2) увеличение количества цемента до 15 % одновременно с увеличением до 20 %

количества химической добавки – гиперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата показывает хорошую динамику набора ранней прочности БТБ: в возрасте 2 суток – на 50 %, в возрасте 7 сут – на 44 %. Такое повышение ранней прочности с применением гиперпластификатора сопровождается снижением В/Ц отношения, что согласуется с основным законом прочности бетона.

На рис. 2 показана зависимость набора прочности БТБ от количества цемента и гиперпластификатора, на рис. 3 – зависимость набора прочности от количества гиперпластификатора.

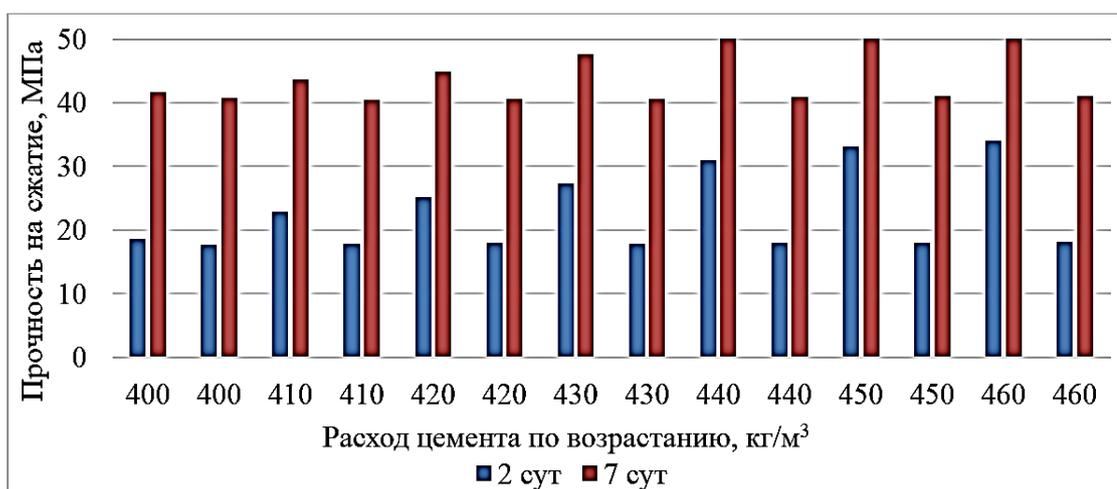


Рисунок 2. Зависимость набора прочности БТБ от количества цемента и гиперпластификатора

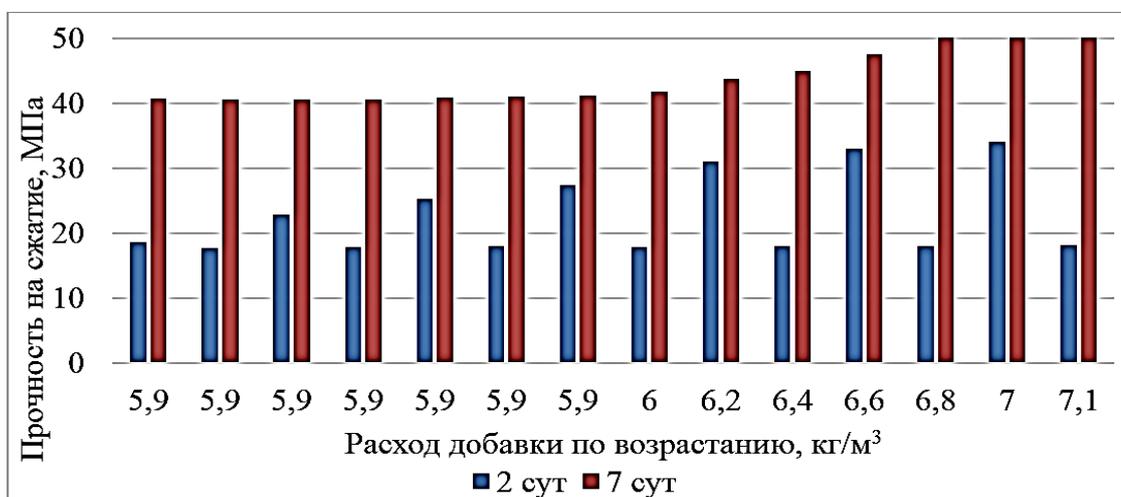


Рисунок 3. Зависимость набора прочности от количества применяемого гиперпластификатора на основе поликарбоксилата РСЕ

Выводы. На основе серии проведенных лабораторных и промышленных испытаний можно сделать вывод, что применение быстротвердеющих модифицированных бетонов является оправданным как с экономической, так и с технической стороны. В отличие от

рядовых составов бетона, модифицированные БТБ позволяют ускорить темпы строительства, так как БТБ с применением микрокремнезема в качестве ускорителя твердения значительно улучшают кинетику набора прочности (до 50 %). Так, при применении БТБ класса В25 замена части цемента микрокремнеземом МКУ-95 в количестве до 12 % позволяет увеличить набор прочности в возрасте 2 суток на 14 %, в возрасте 7 суток – на 24 %, а также снизить расход дорогого цемента ЦЕМ I 52,5Н на 1м³ с 400 кг до 360 кг при сохранении всех прочностных характеристик, указанных в [15].

Установлено, что простое увеличение количества цемента на 15 % с целью улучшения скорости набора прочности не дает заметного эффекта. Применение же гиперпластификаторов на основе поликарбоксилатов до 20 % с одновременным увеличением на 15 % количества цемента является оправданным с учетом сразу нескольких положительных моментов, таких как: уменьшение В/Ц отношения и, соответственно, повышение прочностных характеристик согласно основного закона прочности бетона, улучшение кинетики набора прочности БТБ на 50 % в возрасте 2 суток и на 44 % в возрасте 7 суток.

Это свидетельствует о соответствии полученных результатов теоретическим предположениям о создании дополнительных центров кристаллизации и снижении порового пространства в теле бетона путем использования реакционно-активных пуццоланических добавок (активного микрокремнезема SiO₂), в коллоидной системе идет процесс связывания Ca(OH)₂ активной минеральной добавкой SiO₂ в малорастворимое соединение – гидросиликат кальция по уравнению: $Ca(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O = CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ [20,23].

Из результатов исследования следует, что полученные прочностные характеристики соответствуют теоретическим выкладкам, быстротвердеющие бетоны, модифицированные микрокремнеземом МКУ-95, показывают прочность на сжатие, соответствующую заданному классу бетона В25, при хорошей кинетике набора прочности в возрасте 2 и 7 суток.

Список литературы

1. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
2. Shubham S., Ajay C., Yogesh K., Dirgha S., Behaviour of precast reinforced concrete structural wall systems subjected to in-plane lateral loading // *Engineering Structures*. – 15 August 2021. – Volume 241, 112474. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112474>.
3. Тастанбекова Е.Т., Шукенов И.И., Тепловлажностная обработка железобетонных изделий // *Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова*, 2017. – С. 127-131.
4. Мохамед Х.Х., Ибрагим А.Х., Солиман А.А. К сокращению сроков реализации строительных проектов в условиях ограниченных ресурсов // *Sustainability*. – Jan.-March. 2014. – 2021, 13, 11035. – <https://doi.org/10.3390/su131911035>.
5. Эр. Ранджодх С., Эр. Lekhraj S., Ер. Tarun S., CURING OF CONCRETE: A TECHNICAL STUDY TO INCREASE RATE OF CURING // *International Journal of Advanced Engineering Technology*. – Vol. V. – Issue I. – Pp. 49-53.
6. Chee Ban Cheah, Wee Kang Chow, Chuan Wei Oo, Khang Heng Leow, The influence of type and combination of polycarboxylate ether superplasticizer on the mechanical properties and microstructure of slag-silica fume ternary blended self-consolidating concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Volume 31, 101412. – ISSN 2352-7102. – <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101412>.
7. В.А. Клемм, Р.Л. Бергер, Ускоренное отверждение цементных систем углекислым газом: Часть I: Портландцемент // *Cement and Concrete Research*. – 1972. – Volume 2. – Issue 5. – Pages 567-576. – ISSN 0008-8846. – [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(72\)90111-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90111-1).
8. Кузьмин С.А., Аргунова А.А., Красильников Д.А., Емельянова З.В. Исследование прочности и структуры тяжелого бетона, модифицированного полимерной пропиткой, в условиях холодного климата // *Mater. Sci. Forum*. – 2019, 945, 250-256. – [doi:10.4028/www.scientific.net/](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/)

MSF.945.250.

9. Mao, M.; Zhang, D.; Yang, Q.; Zhang, W. Study of Durability of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate under Alternative Interactions of Freeze-Thaw and Carbonation. *Adv. Civ. Eng.* 2019, 2019, 1-15. – Doi:10.1155/2019/4693893.
10. Утепов Ю., Ахметов Д., Ахматшаева И. Влияние мелких наполнителей из промышленных отходов и различных химических добавок на удобоукладываемость самоуплотняющегося бетона // *Comput. Concr.* – 2020, 25, 59-65. – Doi:10.12989/cac.2020.25.1.059.
11. Киянец А.В. Бетон с переработанным полиэтилентерефталатным волокном // *Mag. Civ. Eng.* – 2018, 84, 109-118. – Doi:10.18720/MCE.84.11.
12. Бегич Ю.Е., Клюев С.В., Жос В.А., Черкашин А.В. Мелкозернистый бетон с различными видами фибры // *Mag. Civ. Eng.* – 2020, 97, 9702. – Doi:10.18720/MCE.97.2.
13. Hasani, M.; Moghadas Nejad, F.; Sobhani, J.; Chini, M. Механические и прочностные свойства бетонного покрытия, армированного волокнами: Экспериментальные результаты и численное моделирование // *Constr. Build. Mater.* – 2021, 268, 121083. – Doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121083.
14. Межгосударственный стандарт ГОСТ 58894-2020 Микрокремнезем для бетонов и растворов. Технические условия. – Доступен на сайте: <https://docs.cntd.ru/document/1200173805> (дата обращения: 2 марта 2022 г.).
15. Межгосударственный стандарт ГОСТ 27006-2019 Бетоны. Правила подбора состава. – Доступно онлайн: <https://docs.cntd.ru/document/1200165762> (дата обращения: 2 марта 2022 г.).
16. Межгосударственный стандарт ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения. – Доступен на сайте: <https://docs.cntd.ru/document/1200177301/titles> (дата обращения: 2 марта 2022 г.).
17. Межгосударственный стандарт ГОСТ 12730.1-2020 Бетоны. Методы определения плотности. – Доступен на сайте: <https://docs.cntd.ru/document/901703627> (дата обращения: 2 марта 2022 г.).
18. EN 206:2013+A1:2016 Concrete-Specification, performance, production and conformity, IDT
19. СТ РК EN 206-2017 «Бетон. Технические требования, показатели, производство и соответствие».
20. Новые модифицированные бетоны [Текст] / [Каприелов, Семен Суменович, Шейнфельд Андрей Владимирович, Кардумян, Галина Суменовна]. – Москва: ООО "Предприятие Мастер Бетон", 2010. – 258 с.: ил., цв. ил., табл.; 24 см. – ISBN 978-5-903391-73-8 (в пер.).
21. EN 197-1:2011 Состав, технические характеристики и критерии соответствия для цементов.
22. Межгосударственный стандарт ГОСТ 24211-2008, Добавки для бетонов и растворов. Общие технические условия.
23. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – С. 708-716.
24. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // *Строительные материалы.* – 2017. – № 1-2. – С. 62–67.
25. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // *Строительные материалы.* – 2016. – № 1-2. – С. 91–95.
26. В.С. Лесовик, А.Д. Толстой, К.Ю. Новиков Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость.* – 2016. – № 2 (17).

References

1. GOST 18105-2018 Betony. Pravila kontrolya i ocenki prochnosti.
2. Shubham S., Ajay C., Yogesh K., Dirgha S., Behaviour of precast reinforced concrete structural wall systems subjected to in-plane lateral loading // *Engineering Structures.* – Volume 241, 15 August 2021, 112474. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112474>.
3. Tastanbekova E.T., SHukenov I.I., Teplovlazhnostnaya obrabotka zhelezobetonnyh izdelij, Nauchnye trudy YUKGU im. M. Auezova, 2017. – S. 127-131.
4. Mohamed H.H., Ibragim A.H., Soliman A.A. K sokrashcheniyu srokov realizacii stroitel'nyh proektov v usloviyah ogranichennyh resursov. *Sustainability* 2021, 13, 11035. <https://doi.org/10.3390/su131911035>.
5. Er. Randzhodh S., Er. Lekhraj S., Er. Tarun S., Curing of concrete: a technical study to increase rate of curing // *International Journal of Advanced Engineering Technology.* – Jan.-March., 2014. – Vol.

- V. – Issue I. – 49-53.
6. Chee Ban Cheah, Wee Kang Chow, Chuan Wei Oo, Khang Heng Leow, The influence of type and combination of polycarboxylate ether superplasticizer on the mechanical properties and microstructure of slag-silica fume ternary blended self-consolidating concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Volume 31, 101412. – ISSN 2352-7102. – <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101412>.
 7. V.A. Klemm, R.L. Berger, Uskorennoe otverzhenie cementnykh sistem uglekislym gazom: CHast' I. Portlandcement // *Cement and Concrete Research*. – 1972. – Volume 2, Issue 5. – Pages 567-576. – ISSN 0008-8846. – [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(72\)90111-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90111-1).
 8. Kuz'min S.A., Argunova A.A., Krasil'nikov D.A., Emel'yanova Z.V. Issledovanie prochnosti i struktury tyazhelogo betona, modifitsirovannogo polimernoy propitkoj, v usloviyah holodnogo klimata. *Mater. Sci. Forum*. – 2019, 945, 250-256. – Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.250.
 9. Mao, M.; Zhang, D.; Yang, Q.; Zhang, W. Study of Durability of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate under Alternative Interactions of Freeze-Thaw and Carbonation // *Adv. Civ. Eng.* 2019, 2019, 1-15. – Doi:10.1155/2019/4693893.
 10. Uteпов YU., Ahmetov D., Ahmatshaeva I. Vliyanie melkih napolnitelej iz promyshlennykh othodov i razlichnykh himicheskikh dobavok na udoboukladyvaemost' samouplotnyayushchegosya betona // *Comput. Concr.* – 2020, 25, 59-65. – Doi:10.12989/cac.2020.25.1.059.
 11. Kiyaneц A.V. Beton s pererabotannym polietilenterefalatnym voloknom // *Mag. Civ. Eng.* – 2018, 84, 109-118. – Doi:10.18720/MCE.84.11.
 12. Begich YU.E., Klyuev S.V., ZHos V.A., CHerkashin A.V. Melkozernistyj beton s razlichnymi vidami fibry // *Mag. Civ. Eng.* – 2020, 97, 9702. – Doi:10.18720/MCE.97.2.
 13. Hasani, M.; Moghadas Nejad, F.; Sobhani, J.; Chini, M. Mekhanicheskie i prochnostnye svoystva betonogo pokrytiya, armirovannogo voloknami: Eksperimental'nye rezul'taty i chislennoe modelirovanie // *Constr. Build. Mater.* – 2021, 268, 121083. – Doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121083.
 14. Mezhhgosudarstvennyj standart GOST 58894-2020 Dym kremnezemistyj dlya betonov i rastvorov // *Tekhnicheskie usloviya*. – Dostupen na sajte: <https://docs.cntd.ru/document/1200173805> (data obrashcheniya: 2 marta 2022 g.).
 15. Mezhhgosudarstvennyj standart GOST 27006-2019 Betony. Pravila sostavleniya smesej. – Dostupno onlajn: <https://docs.cntd.ru/document/1200165762> (data obrashcheniya: 2 marta 2022 g.).
 16. Mezhhgosudarstvennyj standart GOST 12730.3-2020 Betony. Metod opredeleniya vodopogloshcheniya. – Dostupen na sajte: <https://docs.cntd.ru/document/1200177301/titles> (data obrashcheniya: 2 marta 2022 g.).
 17. Mezhhgosudarstvennyj standart GOST 12730.1-2020 Betony. Metody opredeleniya plotnosti. – Dostupen na sajte: <https://docs.cntd.ru/document/901703627> (data obrashcheniya: 2 marta 2022 g.).
 18. EN 206:2013+A1:2016 Concrete-Specification, performance, production and conformity, IDT.
 19. ST RK EN 206-2017 «Beton. Tekhnicheskie trebovaniya, pokazateli, proizvodstvo i sootvetstvie»
 20. Novye modifitsirovannye betony [Tekst] / [Kaprielov, Semen Surenovich, SHEjnfel'd Andrej Vladimirovich, Kardumyan, Galina Surenovna]. – Moskva: OOO "Predpriyatie Master Beton", 2010. – 258 s. : il., cv. il., tabl.; 24 sm. . – ISBN 978-5-903391-73-8 (v per.).
 21. EN 197-1:2011 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements; 2011.
 22. Interstate standard GOST 24211-2008 Admixtures for concretes and mortars. General specifications; 2008.
 23. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biocorrosion of cement concrete, features of its development, assessment and prediction // *Fundamental Research*. – 2014. – C. 708-716.
 24. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. On the use of complex additives in new generation concrete // *Building Materials*. – 2017. № 1-2. – C. 62-67.
 25. Kalashnikov V.I. Evolution of compositions development and concrete strength changes. Concretes of the present and the future // *Stroitelnye materialy*. – 2016. – № 1-2. – C. 91-95.
 26. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Novikov K.Yu. High-strength concretes on composite binders with the use of man-made raw materials // *Izvestiya vuzov. Invest. Construction. Real Estate*. – 2016. – № 2 (17).
-
-