





Научная статья

УДК 691.32

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500>

CC BY 4.0

## Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности

Сергей Петрович Касаткин<sup>1</sup> , Валентина Яковлевна Соловьева<sup>1</sup> , Ирина Васильевна Степанова<sup>1</sup> ,  
Дмитрий Валерьевич Кузнецов<sup>2</sup> , Дмитрий Александрович Сеницин<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: d4013438@yandex.ru

**АННОТАЦИЯ: Введение.** Для создания бетона с набором физико-механических характеристик требуется рациональный подбор компонентов бетонной смеси. Целесообразно рассмотреть использование и тонкодисперсных наполнителей, в том числе на основе вторичных ресурсов, а также требуется высокоэффективная химическая добавка определенной природы и реакционного действия, оказывающая комплексное влияние на бетонную систему. **Методы и материалы.** Эффективность действия компонентов используемой добавки оценивали по изменению показателей прочности на сжатие, прочности на растяжение при изгибе, оценку которых осуществляли по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Для проведения научно-экспериментальных исследований использовали материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, песок природный, тонкодисперсный микрокремнезем, комплексная химическая добавка, обладающая повышенным пластифицирующим и реакционно-активным эффектами действия. **Результаты.** Сочетание поликарбоксилатных полимеров и нанодисперсий гидродиоксида кремния усиливает эффективность действия каждого компонента, что выражается в значительном повышении коэффициента трещиностойкости бетона при высоких показателях прочности на сжатие. Установлено, что при использовании комплексной нанополимерной химической добавки рост прочности на растяжение при изгибе составляет 67% и превосходит рост прочности на сжатие более чем на 30%. Обсуждение. Повышение гидратационной активности в присутствии нанополимерной добавки положительно влияет на уплотнение формирующейся структуры бетона. Подтверждением формирования плотной и прочной структуры при твердении наномодифицированного бетона является повышение водонепроницаемости бетона в 2,5 раза и его морозостойкости более чем в 2,5 раза. **Заключение.** Достоинством наномодифицированного бетона является его повышенная химическая устойчивость относительно углекислотной и магниезиальной коррозии и в соответствии с показателем коэффициента химической стойкости, КХС > 0,8, и ГОСТ Р 58895-2020, разработанный наномодифицированный бетон относится к химически высокостойким бетонам. Нанополимерный бетон с высокими физико-механическими показателями целесообразно рекомендовать для изготовления конструкций воздушных линий (ВЛ) электропередачи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокопрочный бетон, прочность на растяжение при изгибе, долговечность, химическая добавка, нанодисперсии, пластифицирующий эффект, реакционная активность, конструкции ВЛ.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Касаткин С.П., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Кузнецов Д.В., Сеницин Д.А. Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 6. С. 493–500. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500>. – EDN: SNRCRN.

### ВВЕДЕНИЕ

Бетон – один из самых распространенных и универсальных строительных материалов, так как его свойствами, такими как прочность, трещиностойкость, твердость, морозостойкость, можно целенаправленно управлять, улучшая каждый из требуемых

параметров в результате использования определенного компонентного состава или создания и использования высокоэффективных комплексных химических добавок определенной природы.

Технология изготовления бетона является достаточно простой, она заключается в точном дозировании и тщательном перемешивании рационально

© Касаткин С.П., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Кузнецов Д.В., Сеницин Д.А., 2022

подобранных компонентов с целью получения бетонной смеси определенной подвижности, которую используют для изготовления изделий разной формы и конфигурации.

Твердение бетонной смеси и образование бетона на ее основе осуществляется самопроизвольно в естественных условиях при положительной температуре примерно от +5 до +25°C. В процессе твердения бетонной смеси протекают гидратационные процессы и образуются комплексные гидратные соединения различного состава, различной кристаллической структуры, что оказывает влияние на формирование искусственного камня (бетона) с определенными физико-механическими характеристиками [1–10].

Бетоны находят применение в различных областях строительства, например, в дорожном и аэродромном строительстве для создания верхнего покрытия повышенной твердости и прочности используются при создании атомных электростанций для изготовления плотных бесшовных конструкций, а также в высотном домостроении, при создании уникальных зданий типа Лахта-Центр высотой 462 м в Санкт-Петербурге или зданий высотой 268 м в комплексе Москва-Сити в Москве. Кроме того, они востребованы и требуют совершенствования конструкции для воздушных линий (ВЛ) электропередачи, которые помогают обеспечивать электроэнергией большие и малые города в центре страны и в самых удаленных периферийных районах.

Конструкции воздушных линий (ВЛ) электропередачи, представленные стойками, фундаментами абсолютно ничем не защищены от воздействия внешних факторов: ветровых нагрузок, осадков в виде снега или дождя. Основное, что требуется при создании таких конструкций, – добиться повышения их срока службы. Решение такой задачи может быть достигнуто путем создания бетона, отличающегося одновременно повышенной прочностью на растяжение при изгибе при высоких показателях прочности на сжатие, что должно способствовать повышению устойчивости бетонной конструкции к трещинообразованию. Целесообразно и эффективно повысить плотность бетона с целью повышения химической устойчивости бетона, повышения его морозостойкости и водонепроницаемости, что должно оказать положительное влияние на повышение долговечности элементов ВЛ [11–14].

Для создания бетона с набором указанных физико-механических характеристик требуется рациональный подбор компонентов бетонной смеси, в том числе целесообразно рассмотреть использование и тонкодисперсных наполнителей, а также требуется высокоэффективная химическая добавка определенной природы и реакционного действия,

оказывающая комплексное влияние на бетонную систему.

Решению указанных вопросов и созданию высокофункционального бетона посвящено данное исследование.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения научно-экспериментальных исследований использовали материалы, представленные ниже.

1. Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». Физико-механические характеристики портландцемента:

- нормальная плотность цементного теста, % – 25,8;
- начало схватывания, мин – 165;
- конец схватывания, мин – 257;
- прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа – 53,5.

2. Песок природный по ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»:

- модуль крупности песка –  $M_k=2,25$ ;
- содержание пылевидных и глинистых частиц – 1,37%;
- содержание глины в комках – нет.

3. Щебень гранитный фракции 5-10 мм по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»:

- содержание пылевидных и глинистых частиц – 0,93%;
- содержание глины в комках – нет.

4. Рассматривали в качестве наполнителя тонкодисперсный микрокремнезем  $SiO_2$  марки МК-85 ГОСТ Р 58894-2020.

5. Для повышения реакционной активности системы использовали комплексную химическую добавку, обладающую повышенным пластифицирующим и реакционно-активным эффектами действия. В качестве основы добавки использовали поликарбонатный полимер в сочетании с коллоидным раствором на основе нанодисперсий гидроксида кремния  $SiO_2 \cdot nH_2O$ , имеющий размер дисперсий (50–70) нм, и дополнительно в качестве модификаторов использовали вещества органической и неорганической природы, оказывающие умеренное воздухововлечение (в пределах 4–6%) на бетонную смесь.

6. Эффективность действия компонентов используемой добавки относительно компонентов бетонной смеси оценивали по изменению показателей прочности на сжатие, прочности на растяжение при изгибе, оценку которых осуществляли по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Для определения показателей прочности изготавливали образцы-кубы с ребром 100 мм и образцы-призмы размером 100×100×400 мм. Твердение бетонных образцов осуществлялось в нормальных условиях при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и влажности  $W \geq 95\%$ .

Соотношение показателей прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие характеризует устойчивость бетона к трещинообразованию, что имеет принципиальное значение для центрифугированных стоек опор ВЛ, которые имеют высоту до 26 м при толщине стенки до 85 мм. Как указывалось ранее, для повышения долговечности конструкций целесообразно добиваться повышения плотности структуры бетона, используемого для создания конструкций опор ВЛ.

7. Плотность бетона оценивали по ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Методы определения водопоглощения».

8. Долговечность бетона оценивали по показателям морозостойкости и химической стойкости, которые определяли по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» и ГОСТ Р 58896-2020 «Бетоны химически стойкие. Методы испытаний».

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Основная цель данного исследования – создание бетона повышенной устойчивости к трещинообразованию, и решение такого вопроса может быть достигнуто в результате образования в процессе твердения гидросиликатов с повышенным содержанием  $\text{SiO}_2$ , которые относятся к низкоосновным гидросиликатам и при этом обладают волокнистой или игольчатой структурой, оказывающей микроармирующее действие на формирующуюся структуру бетона, оказывая положительное влияние на повышение его прочности на растяжение при изгибе. С этой целью проводили сравнительные исследования по использованию микронаполнителя, представленного микрокремнеземом  $\text{SiO}_2$ , и нанодисперсий гидроксида кремния  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , входящего в состав добавки.

В соответствии с проектными данными, для стоек опор ВЛ чаще всего требуется бетон В30 с маркой по удобоукладываемости бетонной смеси П3. На основании предварительно проведенных подборов состава бетона определен наиболее рациональный расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси:

- портландцемент ПЦ ЦЕМ I 42,5Н – 390 кг;
- песок с  $M_k = 2,25$  – 845 кг;
- щебень фракции (5–10) мм – 950 кг;
- В/Ц – 0,52.

На первом этапе исследования проводили сравнительную оценку эффективности действия микрокремнезема  $\text{SiO}_2$  и нанодисперсий гидроксида кремния  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  в присутствии водного раствора поликарбоксилатного полимера с плотностью  $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$  и значением водородного показателя  $\text{pH} = 6,5$ . Оценку эффективности осуществляли по изменению подвижности бетонной смеси и по показателю прочности на сжатие.

Результаты научно-экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что эффективность действия микрокремнезема ниже, чем нанодисперсий гидроксида кремния, что подтверждается отсутствием пластифицирующего эффекта действия у микрокремнезема, и при этом рост прочности на сжатие в присутствии микрокремнезема составляет 11% относительно бетона, модифицированного поликарбоксилатным полимером, в то время как в присутствии нанодисперсий гидроксида кремния рост прочности составляет 17% (рис. 1) и наблюдается повышение подвижности бетонной смеси, что подтверждается некоторым уменьшением В/Ц отношения в пределах (5–7)%.

Для высотных тонкостенных конструкций принципиальное значение имеет их устойчивость к трещинообразованию, что оценивается показателем прочности на растяжение при изгибе или коэффициентом трещиностойкости,  $K_{\text{тр}} = R_{\text{изг}}/R_{\text{сж}}$ , а также важное значение для всех бетонных конструкций, особенно для тех, которые не защищены от возможного внешнего негативного воздействия, к которым могут быть отнесены конструкции ВЛ, имеет долговечность, которая в некоторой степени взаимосвязана с плотностью формирующейся структуры бетона.

При проведении дальнейших научно-экспериментальных исследований произведена сравнительная оценка показателей трещиностойкости и плотности при использовании в рациональном количестве микрокремнезема и нанодисперсий гидроксида кремния в сочетании с поликарбоксилатным полимером. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Данные, представленные в табл. 2, подтверждают высокую эффективность совместного действия поликарбоксилатного полимера и нанодисперсий гидроксида кремния, которая выражается в значительном повышении коэффициента трещиностойкости при повышенных показателях прочности на сжатие, и при этом уменьшается водопоглощение затвердевшего бетона, что может быть обусловлено уменьшением В/Ц отношения и повышением степени гидратации, т.к. повышение прочности на растяжение при изгибе, как правило, обусловлено не уплотнением структуры бетона, а образованием

Таблица 1

Сравнительная оценка эффективности действия микрокремнезема  $\text{SiO}_2$  и нанодисперсий гидроксида кремния  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  на свойства бетонной смеси и бетона

№ п/п	Класс бетона В, требуемая прочность, МПа	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Водный раствор поликарбоксилатного полимера, масс % от массы цемента	Микрокремнезем ( $\text{SiO}_2$ ), масс % от массы цемента	Нанодисперсии гидроксида кремния ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), масс % от массы цемента	Вода, л	В/Ц	Подвижность бетонной смеси, ОК, см	Прочность на сжатие, МПа
1	В30 $R_{\text{пр}} = 38,4$	390	–	–	–	203	0,52	13	39,2
2		390	0,8	–	–	168	0,43	14	46,8
3		390	1,0	–	–	160	0,41	15	49,8
4		390	1,2	–	–	156	0,40	15	50,4
5		390	1,0	8,0	–	176	0,45	14	53,9
6		390	1,0	10,0	–	179	0,46	14	55,3
7		390	1,0	12,0	–	187	0,48	13	56,0
8		390	1,0	–	0,4	158	0,41	14	56,4
9		390	1,0	–	0,6	152	0,39	14	58,3
10		390	1,0	–	0,8	148	0,38	15	59,0

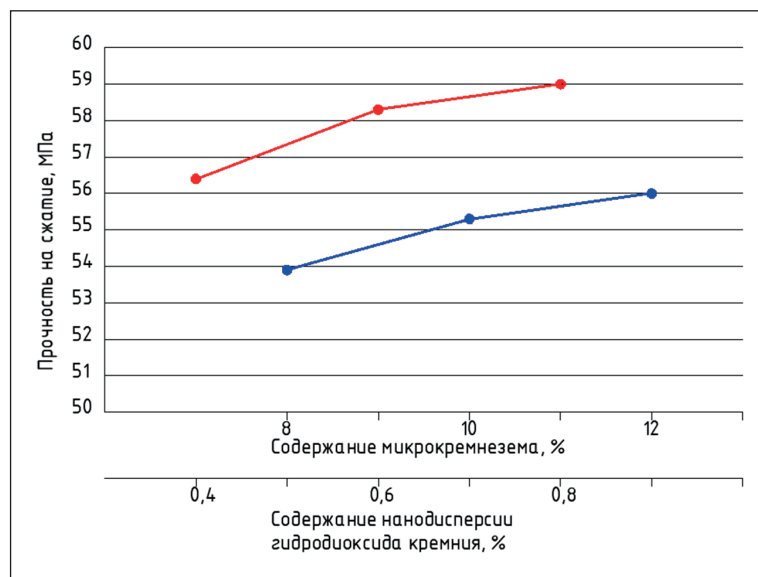


Рис. 1. Влияние микрокремнезема и нанодисперсий гидроксида кремния на показатели прочности на сжатие наномодифицированного бетона

гидросиликатов, отличающихся повышенным содержанием  $\text{SiO}_2$ , т.е. низкоосновных, которые имеют волокнистую структуру и оказывают микроармирующее действие на формирующуюся структуру бетона.

Микрокремнезем относительно нанодисперсий гидроксида кремния обладает, по-видимому, меньшей реакционной активностью и меньшим эффектом действия относительно повышения трещиностойкости бетона. Поэтому дальнейшие исследования по оценке долговечности модифицированного высокопрочного бетона проводили с добавкой на основе поликарбоксилатных полимеров, модифицированных нанодисперсиями гидроксида кремния в сочетании с воздухововлекающим компонентом, обеспечивающим рациональное воздухововлечение в пределах (4–6)%.

В качестве основных параметров долговечности определяли химическую устойчивость модифицированного бетона относительно углекислотной и магниезальной коррозии. С этой целью образцы модифицированного бетона в течение 360 суток выдерживали в 5% растворе  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и в 5% растворе  $\text{MgCl}_2$ . Результаты исследований представлены в табл. 3.

Данные, представленные в табл. 3, показывают, что бетон, модифицированный водным раствором поликарбоксилатного полимера, отличается повы-



Таблица 2

Сравнительная оценка показателей трещиностойкости и плотности бетона в присутствии микрокремнезема и нанодисперсий гидроксида кремния

№ п/п	Проектный класс бетона В, В <sub>об</sub> , требуемая прочность R <sub>сж</sub> , R <sub>нп</sub> , МПа	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Водный раствор поликарбоксилатного полимера, масс % от массы цемента	Микрокремнезём (SiO <sub>2</sub> ), масс % от массы цемента	Нанодисперсии гидроксида кремния (SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O), масс % от массы цемента	В/Ц	Марка по подвижности, П	Прочность, МПа		K <sub>тр</sub> = R <sub>нп</sub> /R <sub>сж</sub>	Водопоглощение W <sub>нп</sub> , %	
								на сжатие	на растяжение при изгибе			
1	В30, В <sub>об</sub> 3,6 R <sub>сж</sub> = 38,4, R <sub>нп</sub> = 4,6	390	–	–	–	0,52	П3	39,2	4,6	0,117	4,2	
2		390	1,0	–	–	0,41	П3	49,8	6,0	0,120	3,9	
3		390	1,0	10,0	–	–	0,46	П3	55,3	6,8	0,123	3,6
4		390	1,0	–	0,6	–	0,39	П3	58,3	7,6	0,130	3,3

Таблица 3

Сравнительные комплексные физико-механические характеристики бетона

№ п/п	Проектный класс бетона В (требуемая прочность, МПа)	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Водный раствор поликарбоксилатного полимера, масс % от массы цемента	Нанодисперсии гидроксида кремния (SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O), масс % от массы цемента	Комплексная химическая добавка, масс % от массы цемента	Прочность на сжатие, МПа	Марка по подвижности, П	Фактический класс бетона, В	Коэффициент химической стойкости, КХС	
									в 5% р-ре Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	в 5% р-р MgCl <sub>2</sub>
1	В30 (38,4)	390	–	–	–	39,0	П3	В30	0,46	0,43
2		390	1,0	–	–	49,6	П3	В40	0,73	0,72
3		390	1,0	0,6	–	58,0	П3	В46	0,87	0,84
4		390	–	–	1,0	52,2	П3	В47	0,89	0,86

шенной прочностью на сжатие и повышенной химической стойкостью, что, по-видимому, обусловлено не только уплотнением структуры бетона за счет пластифицирующего эффекта поликарбоксилатного полимера, но и повышением гидратационной активности компонентов бетонной смеси.

Добавление нанодисперсий гидроксида кремния SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O к поликарбоксилатному полимеру является эффективным и оказывает дополнительное положительное влияние на повышение гидратационной активности бетонной смеси. По-видимому, предварительное перемешивание указанных компонентов в большей степени усиливает собственную эффективность каждого компонента.

В присутствии комплексной химической добавки прочность на сжатие повышается примерно на 52%, и бетон с добавкой соответствует классу В47 относительно проектному классу бетона В30. Модифицированный бетон относится к высокостойкому

относительно углекислотной и магниальной коррозии в соответствии с ГОСТ Р 58895–2020 «Бетоны химически стойкие. Технические условия», в то время как контрольный состав бетона в соответствии с данными табл. 3 является «относительно стойким» бетоном.

Повышение химической стойкости бетона, используемого для стоек или фундаментов опор ВЛ, имеет большое значение, которое необходимо принимать во внимание при проектировании данных конструкций.

Повышение прочности бетона, как правило, сопровождается уменьшением В/Ц отношения в результате пластифицирующего эффекта модификатора или образованием повышенного количества новых комплексных гидратных соединений, уплотняющих и упрочняющих формирующуюся структуру бетона в результате дополнительного образования новых контактов между компонентами бетонной

Таблица 4

Сравнительные комплексные физико-механические характеристики бетона

№ п/п	Проектный класс бетона В (требуемая прочность, МПа)	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Комплексная химическая добавка, масс % от массы цемента	В/Ц	Марка по подвижности, П	Прочность, МПа		Коэффициент трещиностойкости $K_{тр} = R_{тр}/R_{сж}$	Фактический класс бетона		Водопоглощение $W_M$ , %	Марка по водонепроницаемости W	Марка по морозостойкости $F_1$
						на сжатие	на растяжение при изгибе		B	B <sub>тр</sub>			
1	B30, B <sub>тр</sub> 3,6 $R_{сж} = 38,4$ , $R_{тр} = 4,6$	390	–	0,52	П3	39,0	4,6	0,117	B30	B <sub>тр</sub> 4,6	4,3	W4	F <sub>1</sub> 150
2	B30, B <sub>тр</sub> 3,6 $R_{сж} = 38,4$ , $R_{тр} = 4,6$	390	1,0	0,38	П3	59,4	7,7	0,130	B47	B <sub>тр</sub> 6,0	3,2	W10	F <sub>1</sub> 400

смеси, что должно оказывать положительное влияние на показатели долговечности бетона. Для подтверждения высказанных предположений проведены научно-экспериментальные исследования, результаты которых представлены в табл. 4.

Физико-механические показатели модифицированного бетона при одинаковом расходе цемента значительно превосходят показатели прочности и долговечности контрольного состава бетона, что дает основание предполагать, что долговечность модифицированного бетона также увеличится не меньше, чем в 2 раза и должна составить 100 и более лет, что с экономической и экологической точек зрения является эффективным.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Бетонные конструкции для воздушных линий электропередачи, представленные тонкостенными стойками, высотой до 26 м, диаметр которых достигает 0,8 м, а также фундаментами, которые используются для закрепления и установки опор ВЛ, находятся частично в земле, частично на поверхности, не защищены ничем от негативных атмосферных воздействий, таких как попеременное смачивание-высушивание, замораживание-оттаивание. Безусловно, для таких конструкций требуется бетон нового уровня свойств, который одновременно должен обладать набором улучшенных физико-механических характеристик, к наиболее важным из которых относятся трещиностойкость, химическая стойкость, морозостойкость, водонепроницаемость и повышенная прочность на сжатие [15–20].

Улучшение указанных параметров, возможно, и достигается в результате использования эффективной химической добавки на основе высокоэффективных ПАВ, представленных поликарбоксилатным полимером, который обеспечивает суперпластифи-

цирующий эффект. Сочетание данного вида ПАВ с нанодисперсиями  $SiO_2 \cdot nH_2O$  усиливает пластифицирующий и водоредуцирующий эффекты более чем на 27%, и при этом присутствие нанодисперсий в составе добавки значительно повышает ее реакционную активность, обеспечивая образование новых гидратных фаз определенной структуры, что и способствует более высокому росту прочности на растяжение при изгибе и, как следствие, повышению трещиностойкости высокопрочного бетона [21–27].

Использование комплексной химической добавки с наноструктурными элементами позволило в достаточном объеме решить поставленные задачи и создать бетон повышенной надежности и долговечности, который целесообразно использовать для конструкций воздушных линий (ВЛ) электропередач.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Установлено, что для создания бетона, обладающего повышенной устойчивостью к трещинообразованию и повышенной долговечностью, целесообразно использовать комплексную химическую добавку, обладающую повышенным пластифицирующим и реакционно-активным эффектами действия.

Экспериментально подтверждено, что нанодисперсии гидроксида кремния обладают очень хорошей совместимостью с ПАВ на основе поликарбоксилатных полимеров, их совместное присутствие обеспечивает суперводоредуцирующий эффект, обеспечивая уменьшение В/Ц отношения более чем на 27%, повышая плотность структуры бетона, что подтверждается уменьшением величины водопоглощения от значения  $W_M$  (контрольного состава) 4,3% до значения  $W_M$  (наномодифицированного состава) 3,2%.

Рост прочности на растяжение при изгибе составляет 67% при росте прочности на сжатие, равном

52%, который, вероятно, обусловлен, в основном, образованием новых гидратных фаз, имеющих удлиненную волокнистую структуру и оказывающих микроармирующее действие на твердеющую бетонную смесь. К таким гидросиликатам могут быть отнесены низкоосновные, которые в своем составе содержат повышенное количество  $\text{SiO}_2$ , что, по-видимому, становится возможным в присутствии реакционно-

активных нанодисперсий гидроксида кремния  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , входящих в состав комплексной химической добавки.

Разработанный нанополимерный бетон, отличающийся повышенной прочностью, надежностью и долговечностью, целесообразно рекомендовать и использовать для конструктивных элементов опор ВЛ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сватовская Л.Б., Сычева А.М., Соловьева В.Я., Сурин Д.В., Козин П.А., Старчуков Д.С., Сурков В.Н., Юров О.В., Мандрица Д.П., Ершиков Н.В., Соловьев Д.В. Современные идеи управления свойствами композиционных материалов на основе неорганических вяжущих. Санкт-Петербург: ПГУПС, 2015. 78 с.
2. Сахарова А.С. Влияние химической модификации поверхности бетона на повышение его долговечности / А.С. Сахарова, В.Н. Сурков // Башкирский химический журнал. 2020. Т. 27, № 4. С. 59–63. <https://doi.org/10.17122/bcj-2020-4-59-63>.
3. Трофимов Б.Ю. Методы оценки долговечности бетона с высокими эксплуатационными характеристиками / Б.Ю. Трофимов, Л.Ю. Крамар, К.В. Шульдяков // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. 2020. № 962(2), 022010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/2/022010>.
4. Сватовская Л.Б., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Сычева А.М., Коробов Н.В., Старчуков Д.С. Высокопрочный бетон. Патент на изобретение RU 2332388 С1, 27.08.2008. Заявка № 2006143909/03 от 11.12.2006.
5. Ерофеев В.Т., Емельянов Д.В., Родин А.И. Патент №2738151 С1 Российская Федерация. Высокопрочный бетон на основе композиционного вяжущего. Опубл. 08.12.2020.
6. Svatovskaya L.B., Solovieva V.Ya., Stepanova I.V., Starchukov D.S. Nanoadditives from silicon- and iron-containing (III) sol for heavy concrete on ordinary cements. *Nanotechnologies in construction: scientific online journal*. 2010; 2 (5): 61–68.
7. Nikolaev, S.V., Benin, A.V., Popov, A.M. Methodology of the selection of effective dipping and control over the filling depth of open-textured construction materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2131(2): 022055 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/2/022055>. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В. Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10.
9. Kapriyelov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fibrous concrete for monolithic structures. *Construction and Building Materials*. 2013. С. 28.
10. Тараканов О.В., Калашников В.И. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (39). С. 223–229.
11. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Оптимизация структуры и прогнозирование конструкционной прочности бетонов нового поколения // Региональная архитектура и строительство. 2021. №4(49). С. 13–24. [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2021\\_4\\_13](https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_13).
12. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения. // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. №4 (688). С. 30–37.
- Benin A., Bogdanova, E. Influence of storage conditions and corrosive environments on the mechanical properties of GFRP rebars. *Civil and Environmental Engineering*. 2018;14 (2):86–90. <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0011>.
14. Trofimov B.Y., Kramar L.Y., Shuldyakov K.V. Methods of assessing the durability of high performance concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 962(2): 022010. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022010.
15. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Shuldyakov K.V. Introducing pozzolanic admixture to improve frost resistance of pavement concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 451 (1): 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012009>.
16. Belash T.A., Mitrofanova M.N. Pile Foundations for Areas with a Joint Manifestation of Permafrost and High Seismic Activity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463 (2): 022076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022076>.

17. Svatovskaya L., Mikhailova K., Kabanov A., Khamenok N. Specificities of soling processes in technologies of geoconstruction. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 50: 421–429. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_44).

18. Svatovskaya L., Urov, O., Mikhailova, K., Supeliuk, T. Information assessment of natural geosystem preservation in geoconstruction by improving the quality of concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 50: 405–411 [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9\\_42](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_42).

19. Гусев Б.В. Бетоны с наполнителями различной дисперсности и их наномодификация // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т.11, № 4. С. 384–393. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-384-393>.

20. Каприелов С.С., Шейнфильд А.В., Кардунян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 58–63.

21. Зимакова Г.А., Солонина В.А., Зелиг М.П. Высокоэффективные бетоны с применением комплексных добавок и местных сырьевых ресурсов // Архитектура, строительство, транспорт. 2021. №1. С. 38–46.

22. Жукова Г.Г., Сайфулина А.И. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона // Construction and Geotechnics. 2020. Т.11, № 4. С. 58–68. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.4.05>.

23. Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р., Чуйкин А.Е., Кабанец В.В. Роль аморфного кремнезема в процессах структурообразования и упрочнения бетонов. // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 44–46.

24. Каприелов С.С., Шейнфильд А.В. Некоторые особенности механизма действия органо-минеральных модификаторов на цементные системы. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность. 2017. № 1. С. 40–46.

25. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Наномодифицирование цементных композитов на технологической стадии жизненного цикла // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т. 12, № 3. С. 130–139. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139>.

26. Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 3. С. 176–189. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189>.

27. Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 263–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Касаткин Сергей Петрович** – аспирант кафедры «Инженерная химия и естествознание», Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, [kasatkin\\_sergey@mail.ru](mailto:kasatkin_sergey@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6745-4048>

**Соловьева Валентина Яковлевна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная химия и естествознание», Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, [9046185117@mail.ru](mailto:9046185117@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2468-2128>

**Степанова Ирина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная химия и естествознание», Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, [ivstepanova88@mail.ru](mailto:ivstepanova88@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3415-5313>

**Кузнецов Дмитрий Валерьевич** – кандидат технических наук, директор Архитектурно-строительного института, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, [alex.03@mail.ru](mailto:alex.03@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9967-0378>

**Синицин Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, [d4013438@yandex.ru](mailto:d4013438@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3780-2800>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Статья поступила в редакцию 17.10.2022; одобрена после рецензирования 09.11.2022; принята к публикации 15.11.2022.