

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ В
ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА**

**ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USE OF POLYCARBOXYLATE
SUPERPLASTIFIER IN THE PRODUCTION OF CONCRETE**

**BETON ISHLAB CHIQARISHDA POLIKARBOXILAT
SUPERPLASTIFIKATORLARDAN FOYDALANISH
SAMARADORLIGINI TAHLIL QILISH**

Нелюфар Умаровна Дадабаева

ТГТУ кафедра “Экономика транспорта” старший педагог

ORCID: 0000-0005-8002-1323. Адрес и место работы: Узбекистан, г. Ташкент

Аннотация. Проведены лабораторные исследования, направленные на оценку влияния молекулярной структуры поликарбоксилатных суперпластификаторов на реологические свойства и прочностные характеристики цементных композитов и бетона. Исследование учитывает такие параметры, как плотность анионного заряда и длина боковых полиэфирных цепей макромолекул. На основе сравнительных испытаний наглядно продемонстрировано превосходство поликарбоксилатных суперпластификаторов по ключевым техническим показателям над традиционными добавками на основе сульфированного нафталинформальдегидного конденсата (СНФ). Представлены результаты комплексного исследования эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов с учетом специфики их молекулярной структуры, в сравнении с сильнопластифицирующей добавкой на основе технических лигносульфонатов. Использованы термины: реологические свойства, механические характеристики, цементные композиты, анионный заряд, полиэфирные цепи, сульфированный нафталинформальдегидный конденсат (СНФ), лигносульфонаты, макромолекулы, высокорастекающиеся добавки.

Ключевые слова: поликарбоксилатные суперпластификаторы; технические лигносульфонаты; плотность анионного заряда; боковые полиэфирные цепочки; стерический эффект; реологические свойства бетона; подвижность (текучесть) бетонной смеси; механическая прочность; цементные композиты; влияние молекулярной структуры; улучшение свойств бетона.

Nelyufar Umarovna Dadabayeva

TDTU Senior Lecturer of the Department of Transport Economics

ORCID: 0000-0005-8002-1323. Address and Place of Work: (Uzbekistan, Tashkent).

Abstract. *Laboratory studies were conducted aimed at evaluating the influence of the molecular structure of polycarboxylate superplasticizers on the rheological properties and strength characteristics of cement composites and concrete. The research takes into account parameters such as the density of the anionic charge and the length of the side polyether chains of macromolecules. Comparative tests clearly demonstrated the superiority of polycarboxylate superplasticizers over traditional additives based on sulfonated naphthalene-formaldehyde condensate (SNF) in key technical indicators. The results of a comprehensive study on the effectiveness of polycarboxylate superplasticizers are presented, considering the specifics of their molecular structure, in comparison with a highly plasticizing additive based on technical lignosulfonates. Terms used include: rheological properties, mechanical characteristics, cement composites, anionic charge, polyether chains, sulfonated naphthalene-formaldehyde condensate (SNF), lignosulfonates, macromolecules, high-flow additives.*

Key words: *polycarboxylate superplasticizers; technical lignosulfonates; anion charge density; polyester side chains; steric effect; rheological properties of concrete; mobility (fluidity) of the concrete mixture; mechanical strength; cement composites; influence of molecular structure; improvement of concrete properties.*

Nelyufar Umarovna Dadabayeva

TDTU transport iqtisodiyoti kafedrası katta o'qituvchisi

ORCID: 0000-0005-8002-1323. Manzil va ish joyi: O'zbekiston, sh. Toshkent

Annotatsiya. *Polikarboxilat superplastifikatorlarining molekulyar tuzilishi ta'sirini sement kompozitlari va betonning reologik xususiyatlari hamda mustahkamlik xarakteristikalariga baholashga yo'naltirilgan laboratoriya tadqiqotlari o'tkazildi. Tadqiqotda anion zaryadining zichligi va makromolekulalarning yon polyefir zanjirlarining uzunligi kabi parametrlar hisobga olindi. Taqqoslash testlari asosida polikarboxilat superplastifikatorlarining asosiy texnik ko'rsatkichlari bo'yicha sulfitlangan naftalinformaldehid kondensati (SNF) asosidagi an'anaviy qo'shimchalarga nisbatan ustunligi aniq ko'rsatildi. Molekulyar tuzilishining o'ziga xosligini hisobga olgan holda polikarboxilat superplastifikatorlarni qo'llash samaradorligini texnik lignosulfonatlar asosidagi kuchli plastifikator qo'shimchasi bilan solishtirib ko'rsatadigan kompleks tadqiqot natijalari taqdim etildi. Foydalanilgan terminlar: reologik xususiyatlar, mexanik xarakteristikalar, sement kompozitlari, anion zaryad, polyefir zanjirlar, sulfitlangan naftalinformaldehid kondensati (SNF), lignosulfonatlar, makromolekulalar, yuqori oqimlik qo'shimchalar.*

Kalit so'zlar: *polikarboxilat superplastifikatorlar; texnik lignosulfonatlar; anion zaryad zichligi; yon poliéfir zanjirlari; sterik effekt; betonning reologik xususiyatlari; beton aralashmasining harakatlanishi (oqimligi); mexanik mustahkamlik; sement kompozitlari; molekulyar tuzilishining ta'siri; betonning xususiyatlarini yeshivas.*

Введение

Использование химических добавок в производстве бетона является одним из самых эффективных и универсальных методов управления его свойствами путем регулирования реологических характеристик бетонных

смесей [1–6]. На сегодняшний день в индустрии строительных материалов применяются три основных класса пластифицирующих добавок: соединения на основе технических лигносульфонатов (ЛСТ) и их производных; сульфированные полимеры меламинформальдегидного или нафталинформальдегидного типа; поликарбоксилатные эфиры (ПКС).

Добавки первых двух групп характеризуются линейной молекулярной структурой и относятся к предыдущему поколению пластификаторов. Их механизм действия основан на электростатическом отталкивании, возникающем вследствие хемосорбции молекул пластификатора на поверхности частиц цементного клинкера и формирования двойного электрического слоя. Это приводит к смещению значения ζ -потенциала в более электроотрицательную область и способствует диспергированию системы [7]. Однако спустя короткое время, по мере образования продуктов гидратации на поверхности цементных зерен, их диспергирующая эффективность резко снижается, что приводит к ухудшению подвижности бетонной смеси.

В отличие от них, поликарбоксилатные эфиры (ПКС) обладают разветвленной молекулярной структурой, состоящей из основной поликарбоксильной цепи с боковыми полиэфирными ответвлениями. Такая конфигурация обеспечивает частицам цемента как электростатическое, так и стерическое (пространственное) отталкивание. Ионный заряд основной цепи необходим для адсорбции поликарбоксилатов на поверхности цементных зерен и создания электростатического эффекта, тогда как боковые полиэфирные цепочки обеспечивают стерическое отталкивание, усиливая и продлевая диспергирующее действие.

Эффективность поликарбоксилатных суперпластификаторов определяется плотностью заряда их основной цепи, а также химической структурой, длиной и количеством боковых полиэфирных ответвлений [8]. По параметрам сохраняемости свойств и способности снижать водоцементное отношение они значительно превосходят традиционные добавки на основе технических лигносульфонатов и сульфированных меламинформальдегидных или нафталинформальдегидных полимеров, что делает их незаменимыми в современных строительных технологиях. В результате даже при минимальных дозировках ПКС обеспечивают высокую текучесть, стабильность (отсутствие расслоения) бетонных смесей и высокие эксплуатационные характеристики.

Использование ПКС позволяет целенаправленно управлять процессами структурообразования, создавая высококачественные композиционные материалы для различных целей. Это обеспечивает повышение технологических показателей бетонных смесей и улучшение строительных и технических свойств готовых изделий. За рубежом поликарбоксилатные суперпластификаторы (ПКС) уже широко применяются, что связано с их повышенной эффективностью, экологичностью, коррозионной безопасностью и способностью увеличивать прочность бетона. В России же доля ПКС в общем объеме пластифицирующих добавок остается незначительной. Это объясняется недостаточным развитием и внедрением современных технологий бетонирования. Кроме того, часто упускается из виду, что снижение концентрации ПКС в бетонных смесях и экономия цемента при их использовании в ряде случаев не только не повышают себестоимость бетона, но и уменьшают ее, одновременно предоставляя все перечисленные преимущества.

Компания ООО «Zakikimyo» разработала линейку отечественных высокоэффективных поликарбоксилатных суперпластификаторов нового поколения, не уступающих по качеству импортным аналогам. Технология их производства и состав этих суперпластификаторов защищены патентом. Путем изменения условий синтеза были получены поликарбоксилаты с различным строением основной цепи и боковых полиэфирных ответвлений. Это позволило создать материалы с разным соотношением стерического эффекта и плотности анионного заряда в макромолекуле, учитывая состав используемого вяжущего вещества. Структуры полимеров суперпластификаторов варьируются по длине и составу основной цепи, а также по длине, химической природе, количеству боковых цепей и плотности анионного заряда. Следует отметить, что, к сожалению, не существует универсальной пластифицирующей добавки, которая бы обеспечивала одинаково высокую эффективность независимо от характеристик исходных материалов и технологии производства бетона. Для каждого конкретного случая и типа цемента необходимо подбирать добавку в соответствии с заданными параметрами технологии бетонирования и требуемыми свойствами бетона. Известно, что цементы разных производителей отличаются по своему составу и свойствам. В литературе имеется достаточно много исследований, посвященных влиянию поликарбоксилатных суперпластификаторов на свойства бетонов, однако большинство из них выполнено зарубежными авторами на импортных цементах. Поэтому изучение эффективности применения ПКС на основе

цементов российских производителей является актуальной задачей с точки зрения внедрения передовых технологий и повышения экологической безопасности.

Известно, что диспергирующая эффективность поликарбоксилатных суперпластификаторов (одинаковой химической природы) и время сохраняемости бетонных смесей зависят от соотношения между длиной боковых цепей и плотностью ионного заряда. Согласно предположению, молекулы поликарбоксилатных суперпластификаторов с высокой плотностью ионного заряда демонстрируют лучшую адсорбцию и эффективный диспергирующий эффект, однако это может негативно влиять на сохраняемость таких систем. Моделирование связи между структурой и свойствами полимерных соединений является одной из фундаментальных проблем современной химии. Установление количественных взаимосвязей между структурой пластификатора и свойствами бетона необходимо для прогнозирования их влияния на цементные системы и целенаправленного синтеза более эффективных аналогов, что позволит достичь нового уровня качества строительных материалов. В данной работе проведено исследование влияния молекулярной структуры поликарбоксилатных суперпластификаторов на подвижность, сохраняемость и прочностные характеристики цементных и бетонных смесей. Также выполнено сравнение эффективности поликарбоксилатных суперпластификаторов, учитывая особенности их молекулярной структуры, с добавкой на основе сульфированного нафталинформальдегида и сильнопластифицирующей добавкой на основе технических лигносульфонатов.

Исследование эффективности поликарбоксилатных суперпластификаторов с учетом их молекулярной структуры в сравнении с добавкой на основе сульфированного нафталинформальдегида

материалы и методы исследования

Для оценки влияния поликарбоксилатных добавок на свойства бетонных смесей по сравнению с добавкой на основе сульфированного нафталинформальдегида были использованы соединения, разработанные ООО «Zakikimyo». Эти соединения отличаются по молекулярной структуре и соответствуют определенным маркам из коммерческого ассортимента компании. Применяемые вещества синтезировали методом радикальной полимеризации ненасыщенных эфиров

полиоксипропиленгликолей с молекулярной массой от 1000 до 5000 Да и ненасыщенной монокарбоновой кислотой [9].

Схематические структуры этих полимеров представлены на рисунке 1. Плотность анионного заряда зависит от количества карбоксильных групп в основной цепи суперпластификатора и характеризуется их концентрацией: ПКС-1, ПКС-3 и ПКС-4 имеют одинаковую плотность заряда, составляющую 1800 мкэкв/г. ПКС-2 отличается более высокой плотностью заряда — 2300 мкэкв/г. Боковые цепи в образцах различаются по молекулярной массе: В ПКС-3 боковые цепи имеют ММ \approx 1000 Да. В ПКС-1 и ПКС-2 — ММ \approx 2000 Да. В ПКС-4 присутствуют боковые цепи с ММ \approx 1000 и 2000 Да. Рисунок 1. Схематическое изображение структуры поликарбоксилатных суперпластификаторов различных типов. Это исследование позволяет установить взаимосвязь между молекулярной структурой поликарбоксилатных суперпластификаторов и их эффективностью в улучшении свойств бетонных смесей, а также сравнить их с традиционными добавками на основе сульфированного нафталинформальдегида.

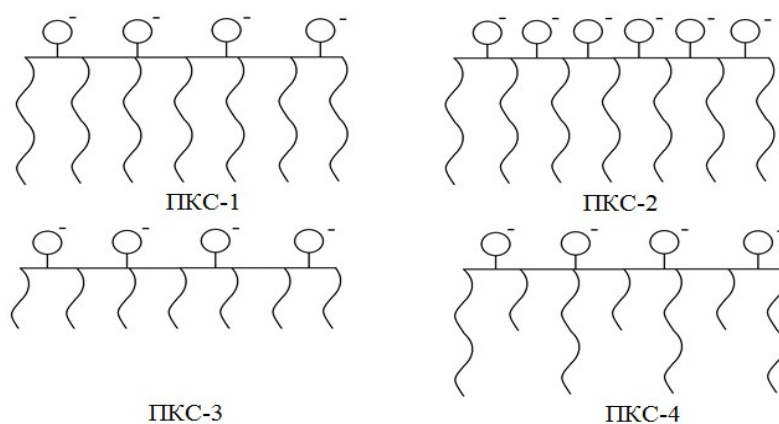


Рисунок 1 – Схема структуры поликарбоксилатных суперпластификаторов

Изучение влияния структуры поликарбоксилатных пластификаторов проводили на цементных растворах с применением вяжущих производственных марок ООО «Тулацемент», ЗАО «Осколцемент» и ОАО «Вольскцемент». Химический и минералогический состав представлен в таблице 1

Таблица 1 – Химический и минералогический состав используемых цементов

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Щелочи в перес- чете на Na ₂ O	Нераст- вори- мый осадок	Удельная поверх- ность, см ² /г	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Цемент I 4 ,5 Н производства ООО «Тулацемент»													
20,59	4,86	3,74	63,79	2,53	2,68	0,03	0,65	0,68	3440	59	14	6	13
Цемент I 4 ,5 Н производства ЗАО «Осколцемент»													
21,52	5,83	4,50	66,03	0,57	0,28	0,001	0,66	2,59	2820	64,9	14	9	12,1
Цемент ПЦ 500-Д0-Н производства ОАО «Вольскцемент»													
20,50	4,50	4,50	63,00	1,50	3,00	0,02	0,7	0,2	3450	67	11	4	15

Реологические характеристики цементных растворов изучались с использованием лабораторного мини-конуса ($D=41$ мм, $d=1$ мм, $H=60$ мм) (см. рис.). Доза вводимых поликарбоксилатных добавок составляла 0,18% в пересчете на сухое вещество от массы цемента. Водоцементное отношение (В/Ц) было установлено равным 0,3.

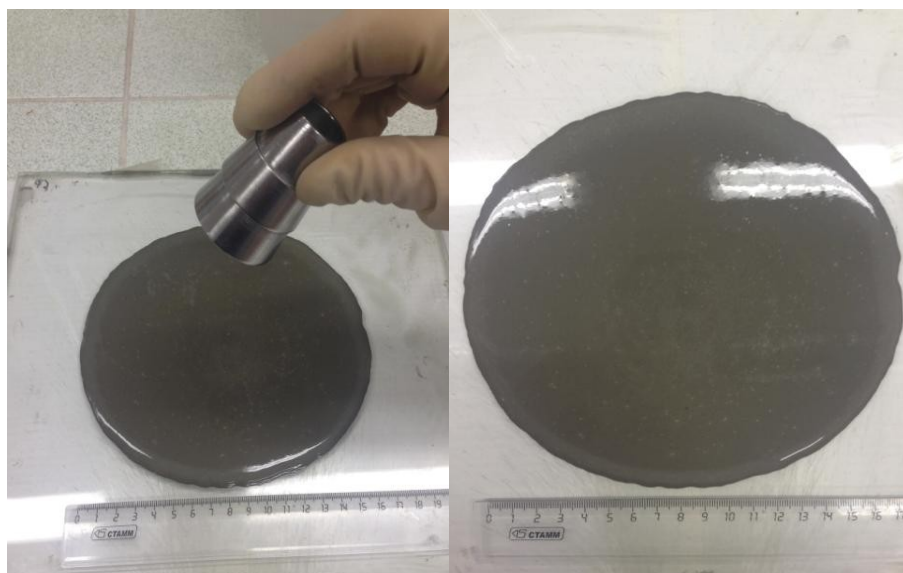


Рисунок 2 – Испытания цементных паст с ПКС с применением лабораторного миниконуса

Результаты и обсуждение

Исследование подвижности цементных смесей в зависимости от структуры поликарбоксилатного суперпластификатора

Для оценки подвижности цементных паст в зависимости от структуры поликарбоксилатного суперпластификатора проводили измерение диаметра расплыва мини-конуса. Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица 2 – Реологические свойства цементной смеси в зависимости от структуры поликарбоксилатного суперпластификатора

Наименование суперпластификатора (СП)	Расход СП по сух, % от массы цемента	В/Ц	Диаметр расплыва миниконуса, мм			
			0 мин	60 мин	1 0 мин	180 мин
Цемент I 4 ,5 Н производства ООО «Тулацемент»						
ПКС-1	0,18	0,3	155	150	165	125
ПКС-2	0,18	0,3	170	140	130	90
ПКС-3	0,18	0,3	145	130	125	110
ПКС-4	0,18	0,3	150	180	175	135
Цемент I 4 ,5 Н производства ЗАО «Осколцемент»						
ПКС-1	0,18	0,3	190	165	150	125
ПКС-2	0,18	0,3	210	160	130	100
ПКС-3	0,18	0,3	185	115	105	70
ПКС-4	0,18	0,3	175	165	155	135
Цемент ПЦ 500-Д0-Н производства ОАО «Вольскцемент»						
ПКС-1	0,18	0,3	200	180	175	155
ПКС-2	0,18	0,3	220	170	160	140
ПКС-3	0,18	0,3	190	145	130	110
ПКС-4	0,18	0,3	200	185	180	160

Согласно данным из работы [10], увеличенная плотность ионного заряда в основной цепи поликарбоксилатного суперпластификатора свидетельствует о его потенциально высокой адсорбционной способности на поверхности зерен цементного клинкера, а удлиненные боковые цепочки способны обеспечить значительное стерическое отталкивание. Молекулы с повышенным электростатическим эффектом лучше взаимодействуют с гидратирующимися цементными частицами и могут усиливать процессы гидратации, что приводит к ускоренному росту новообразований на поверхности клинкерных зерен и снижению диспергирующего действия, которое со временем поддерживается

преимущественно за счет стерического отталкивания. Полученные в данном исследовании результаты на различных производственных марках цемента хорошо соответствуют описанной теории.

Анализ данных таблицы показывает высокую начальную текучесть образцов цементного теста с добавками ПКС-1 и ПКС-2. Указанные соединения имеют одинаковые по длине боковые цепочки, но различаются по электростатической силе. ПКС-2, обладая более высоким ионным зарядом, вероятно, в большей степени адсорбируется на цементных зернах, обеспечивая лучшую подвижность и ускоренное протекание гидратационных реакций. В результате начальная текучесть цементной пасты выше и составляет 170–200 мм по сравнению с ПКС-1, где распływ конуса равен 155–190 мм. Однако при испытаниях после 60, 120 и 180 минут выдержки образец с добавкой ПКС-1 продемонстрировал лучшие результаты по сохраняемости текучести. Цементное тесто с добавкой ПКС-3 демонстрирует самые низкие реологические свойства среди рассмотренных вариантов. Невысокая плотность ионного заряда в основной цепи обеспечивает уровень адсорбции молекул полимера на поверхности цементных зерен, который сопоставим с ПКС-1 и ПКС-4, но уступает ПКС-2. При этом длина боковых цепей у ПКС-3 почти вдвое меньше по сравнению с другими суперпластификаторами, изученными в данной работе, что приводит к снижению стерического эффекта. В результате наблюдается низкая начальная подвижность смеси (145–190 мм). Это также объясняет, почему эффективность ПКС-3 со временем снижается быстрее: короткие боковые цепи не способны обеспечить достаточный уровень стерического отталкивания, который достигается при использовании поликарбоксилатных соединений с более длинными боковыми ответвлениями, характерными для ПКС-1, ПКС-2 и ПКС-4.

Особый интерес вызывают результаты испытаний суперпластификатора ПКС-4, который характеризуется наличием боковых цепей разной длины в своей молекулярной структуре. Начальная подвижность цементной пасты с добавкой ПКС-4 (150–200 мм) оказалась ниже, чем у ПКС-2, обладающего высоким ионным зарядом и длинными боковыми цепями (170–200 мм), а также ниже, чем у ПКС-1 с аналогичной плотностью заряда и постоянной длиной длинных боковых цепей (155–200 мм). Однако в ходе испытаний в течение следующих 180 минут было обнаружено, что цементная смесь с ПКС-4 демонстрирует наибольшие показатели расплыва конуса.

В случае ПКС-4 концентрация длинных боковых цепей, отвечающих за продолжительный диспергирующий эффект, ниже, чем у ПКС-1 и ПКС-2, что предполагало бы снижение его эффективности в плане сохраняемости подвижности смеси. Тем не менее, полученные данные указывают на обратную тенденцию: можно наблюдать определенный синергетический эффект от сочетания коротких и длинных боковых цепей. Согласно патентной информации [11], считается, что короткие звенья молекулы связываются с поверхностью частиц и образующимися на ней гидратными структурами, в то время как длинные цепи выполняют функцию диспергирования. Такая молекулярная конфигурация суперпластификатора способна обеспечить усиленный замедляющий эффект схватывания и увеличить жизнеспособность строительных смесей.

Исследование реологических и прочностных свойств бетона с использованием поликарбоксилатных суперпластификаторов

Исходя из анализа данных об изменении подвижности цементных смесей в зависимости от структуры поликарбоксилатных соединений, была синтезирована новая марка поликарбоксилатного суперпластификатора «Zakikimyo П-153». В данной работе представлены результаты сравнительных испытаний «Zakikimyo П-153», характеризующегося боковыми цепочками различной длины, с нафталинформальдегидным суперпластификатором марки MasterRheobuild PC 3000, производимым компанией BASF. Технические характеристики суперпластификаторов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства «Zakikimyo П-153 » и «MasterRheobuild PC 3000»

№ п/п	Наименование суперпластификатора	Внешний вид	Плотность, г/см ³	Показатель активности ионов водорода, ед. рН
1.	«Zakikimyo П-153»	от бесцветного до желтого цвета	1,08-1,1 (при 5 °С)	6,0-8,5
2.	«MasterRheobuild PC 3000»	однородная жидкость темно-коричневого цвета	1,21-1,5 (при 0 °С)	7-11

Бетонные смеси готовили следующим образом: в смеситель загружали и перемешивали строительный песок с модулем крупности 2,5 согласно ГОСТ 8736-93, щебень фракции 5–10 мм по ГОСТ 8267-93 и цемент производства ООО «Тулацемент». Состав бетона был следующим: 390 кг цемента, 845 кг песка и 975 кг гравия. Пластифицирующую добавку вводили в виде раствора в последней трети воды затворения. Подвижность определила бетонной смеси касаясь по осадке конуса (ОК).

Сохраняемость смеси оценивалась через 30 и 60 минут после приготовления. Прочностные показатели определяли после 8 часов тепловлажностной обработки (ТВО), а также на 1-е и 28-е сутки при нормальных условиях твердения (НУ). Для испытаний изготавливались кубические образцы размером 100×100×100 мм. Концентрация добавки, водоцементное отношение, реологические и прочностные характеристики бетонов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Реологические и прочные свойства бетона с добавкой «Zakikimyo П-153 » и «Master Rheobukd PC3000»

№ п/п	Наименование добавки	Расход добавки, % от массы цемента	В/Ц	Осадка конуса, см			Плотность, кг/см ³	Прочность, МПа		
				0 мин	30 мин	60 мин		8 часов ТВО	1 сутки НУ	28 суток к НУ
1.	«MasterRheobuild PC 3000»	1%	0,5	16	0	0	2419	13,74	4,69	25,28
2.	«Zakikimyo П-153»	0,5%	0,43	25	19	18	2399	18,76	7,69	33,17
3.	“Zakikimyo П-153”	0,5%	0,41	25	19	18	2405	24,20	7,74	36,56

Использование поликарбоксилатного суперпластификатора «Zakikimyo П-153» позволяет получить бетон с повышенной подвижностью и сохраняемостью при одновременном снижении водоцементного отношения и дозировки добавки. Например, начальная осадка конуса бетона с 1,0 % добавки «MasterRheobuild PC 3000» составила 16 см, тогда как введение вдвое меньшего количества «Zakikimyo П-153» увеличило подвижность до 25 см и снизило водоцементное отношение на 18 % — с 0,5 до 0,41. Как показано в таблице 4, сохраняемость бетонной смеси с поликарбоксилатным суперпластификатором остается высокой в течение 60 минут (осадка конуса уменьшается с 25 до 18 см), в то время как смесь с добавкой «MasterRheobuild PC 3000» теряет текучесть уже через 30 минут. Водоредуцирующий эффект «Zakikimyo П-153» способствует повышению прочностных характеристик бетона. Максимальное увеличение прочности наблюдается при В/Ц 0,41 и составляет 76 % (от 13,74 МПа до 24,20 МПа) после 8 часов тепловлажностной обработки и 45 % (от 25,58 МПа до 36,56 МПа) после 28 суток нормального твердения. Также следует отметить ускорение набора прочности при использовании «Zakikimyo П-153»: после первых суток твердения прочность бетона на сжатие составила 7,7 МПа, тогда как с «MasterRheobuild PC 3000» — всего 4,7 МПа.

Исследование эффективности поликарбоксилатных суперпластификаторов с учетом их молекулярной структуры в сравнении с сильнопластифицирующей добавкой на основе технических лигносульфонатов

Материалы и методы исследования

Для оценки влияния поликарбоксилатных добавок на свойства бетонных смесей по сравнению с лигносульфонатами (ЛСТ) были использованы соединения, произведенные ООО «Zakikimyo». Эти соединения отличались по молекулярной структуре и были получены методом радикальной полимеризации ненасыщенных эфиров полиоксиалкиленгликолей с молекулярной массой (ММ) от 1000 до 5000 Да и ненасыщенной монокарбоновой кислотой. Схематические изображения структур этих полимеров представлены на рисунке 1.

Образец ПКС-3 характеризовался плотностью заряда 1800 мкэкв/г и имел боковые цепи с ММ около 1000 Да, тогда как ПКС-2 обладал более высокой плотностью заряда 2300 мкэкв/г и боковыми ответвлениями с ММ около 2000 Да. Характеристики исследуемых добавок определяли и сравнивали в соответствии с требованиями ГОСТ 30459-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов». Для приготовления бетонных смесей в качестве вяжущего материала использовался портландцемент марки ПЦ500-Д0. В качестве заполнителей применяли гранитный щебень фракции 5–10 мм по ГОСТ 8267 и песок I класса с модулем крупности 1,8 по ГОСТ 8736.

Состав бетона, рассчитанный на 1 м³ смеси, включал:

Цемент: 350 кг , Песок: 850 кг , Щебень: 1050 кг

Пластифицирующие добавки вводили одновременно с водой затворения, обеспечивая равномерное распределение компонентов в смеси. Концентрация поликарбоксилатных суперпластификаторов (ПКС) составляла 0,5% от массы цемента, а для лигносульфонатов (ЛСТ) — 1,0%. Сохраняемость бетонных смесей оценивали через 30 и 60 минут после приготовления. Для испытаний были изготовлены кубические образцы размером 100×100×100 мм. Прочностные характеристики определяли на 3-и и 28-е сутки при нормальных условиях твердения.

Результаты и обсуждения

В таблице 5 представлено сравнение прочностных характеристик бетонов с добавками ПКС различной молекулярной структуры и бетона с

сильнопластифицирующей добавкой на основе ЛСТ (контрольный состав). Подвижность контрольной смеси с ЛСТ и основных смесей с ПКС соответствовала осадке конуса 2–4 см, при этом водоцементное отношение всех смесей было одинаковым и равнялось 0,4.

Таблица 5 – Прочность на сжатие бетона с добавкой поликарбоксилатных суперпластификаторов и ЛСТ

№ п/п	Наименование добавки	Расход материалов на 1 м ³ бетона					Прочность на сжатие на 3 сутки нормального твердения	Изменение прочности бетона относительно контрольного состава, %
		Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Добавка			
						% от массы цемента	кг	
1	ЛСТ (контрольный)	350	850	1050	1,2	4,2	31,4	-
2	ПКС-3	350	850	1050	0,5	1,75	36,2	15,3
3	ПКС-2	350	850	1050	0,5	1,75	38,2	21,3

Бетоны с добавлением ПКС, по сравнению с контрольным образцом, продемонстрировали повышение прочностных характеристик на 15,3% и 21,3% в возрасте 3 суток. Этот факт указывает на возможность снижения расхода цементного вяжущего при достижении прочностных показателей, соответствующих контрольному составу. Чтобы подтвердить это предположение, были проведены исследования прочностных и реологических свойств бетона с уменьшенным содержанием цементного вяжущего. Водоцементное отношение подбирали таким образом, чтобы при заданной дозировке пластифицирующей добавки начальная осадка конуса соответствовала классам подвижности П4–П5.

Результаты испытаний, представленные в таблице 6, показывают, что введение ПКС в количестве в два раза меньшем позволяет получать начальную подвижность (осадку конуса), практически аналогичную образцу с ЛСТ.

Таблица 6 – Пластические и прочностные свойства бетона с добавками поликарбоксилатных суперпластификаторов и ЛСТ

№ п/п	Наименование добавки	Расход цемента, кг/м ³	Расход добавки		В/Ц	Осадка конуса через, мин			Прочность на 8 сутки, МПа
			% от массы цемента	кг/м ³		0	30	60	
1	ЛСТ (контрольный)	350	1,2	4,2	0,56	18	10	-	37,3
2	ПКС-3	330	0,55	1,82	0,56	21	-	-	36,8
3	ПКС-2	330	0,55	1,82	0,56	24	14	6	39,2

Бетонная смесь с добавлением ПКС демонстрирует более высокую начальную осадку конуса по сравнению с составами, содержащими ЛСТ и ПКС-3. Такие различия в реологической эффективности поликарбоксилатных суперпластификаторов с различной молекулярной структурой подтверждаются их механизмом действия [10]. У ПКС-2 более высокая плотность ионного заряда в основной цепи, что усиливает сорбцию молекул поликарбоксилата на поверхности цементных зерен и, следовательно, приводит к улучшению начальной подвижности системы. Наличие более длинных боковых цепей в структуре продукта (с молекулярной массой ≈ 2000 Да) обеспечивает бетонной смеси с ПКС-2 лучшую сохраняемость свойств. В свою очередь, бетон с добавкой ПКС-3 обладает сниженными реологическими показателями, что обусловлено более низкой плотностью ионного заряда основной цепи ПКС-3 и более короткими боковыми полиоксикалиленгликолевыми цепями (с молекулярной массой ≈ 1000 Да), которые не обеспечивают тот же уровень стерического отталкивания, как у ПКС-2. Быстрая потеря подвижности бетонной смеси с ПКС-3, вероятно, связана с недостаточным стерическим эффектом и короткой длиной боковых цепей в ПКС-3.

Молекулы с усиленным электростатическим эффектом более эффективно взаимодействуют с гидратированными цементными частицами и способны ускорять процессы гидратации. Это приводит к ускоренному росту новообразований на поверхности клинкерных зерен и повышению прочности бетона.

Данные результаты (см. таблицу 6) демонстрируют, что при использовании ПКС расход цемента можно снизить с 350 кг/м^3 (для состава с ЛСТ) до 330 кг/м^3 для бетона с ПКС, при этом прочность бетона не уменьшается: прочности образцов с ПКС-3 и ПКС-2 составляют $36,8 \text{ МПа}$ и $39,1 \text{ МПа}$ соответственно и отличаются не более чем на 10%, что не превышает нормального коэффициента вариации прочностных свойств бетона при испытаниях на осевое сжатие. В этом случае расход цемента на 1 м^3 бетона сокращается на 5,7%, а расход ПКС по сравнению с ЛСТ ниже в 2,3 раза. Снижение потребления ПКС по сравнению с пластификаторами предыдущего поколения позволяет уменьшить логистические затраты. Известно, что применение ЛСТ в качестве пластифицирующей добавки может дополнительно способствовать повышенному воздухоовлечению, увеличивать пористость системы и снижать прочностные характеристики. ПКС лишены этого недостатка, и при их использовании не всегда требуется дополнительное введение пеногасителей. Кроме того, ЛСТ,

являясь отходами производства целлюлозно-бумажных комбинатов, не имеют постоянного химического состава и содержат различные примеси, вследствие чего бетон не обладает стабильными свойствами. Напротив, ПКС производятся посредством регулируемого синтеза, обладают значительно большей однородностью состава, что обеспечивает высокую стабильность их эксплуатационных характеристик.

Выводы

Проведенное исследование влияния молекулярной структуры поликарбоксилатных суперпластификаторов на подвижность и прочность бетонных смесей подтвердило их высокую эффективность по сравнению с нафталинформальдегидными суперпластификаторами и техническими лигносульфонатами. Несмотря на более высокую стоимость ПКС, комплексная оценка, учитывающая все факторы — качество бетона, технологические параметры его производства, экономию цемента и логистические аспекты, — показывает, что себестоимость бетона с применением ПКС часто оказывается ниже, чем при использовании более дешевых пластификаторов предыдущего поколения.

Экономический вывод и оценка повышения эффективности производства

Использование поликарбоксилатных суперпластификаторов позволяет снизить водоцементное отношение и уменьшить расход цемента без потери прочностных характеристик бетона. Экономия цемента на 5–10% напрямую снижает материальные затраты на производство. Кроме того, меньшая дозировка ПКС по сравнению с традиционными добавками снижает расходы на транспортировку и хранение химических реагентов, что уменьшает логистические издержки. Повышенная подвижность и сохраняемость бетонных смесей с ПКС ускоряет процессы укладки и уплотнения, что сокращает трудозатраты и время строительства. Ускорение набора прочности бетона позволяет быстрее переходить к следующим этапам строительства, что улучшает оборачиваемость средств и повышает общую эффективность проекта. В долгосрочной перспективе повышение качества бетона благодаря использованию ПКС приводит к увеличению долговечности строительных конструкций и снижению затрат на их обслуживание и ремонт. Это дополнительно усиливает экономический эффект от применения поликарбоксилатных суперпластификаторов.

Оценка повышения эффективности производства:

Снижение себестоимости бетона за счет экономии цемента и уменьшения дозировки добавок. Ускорение строительных процессов благодаря улучшению реологических свойств и быстрому набору прочности. Снижение логистических расходов из-за меньшего объема используемых добавок. Повышение качества и долговечности строительных изделий, что уменьшает затраты на эксплуатацию и ремонт. Повышение конкурентоспособности продукции благодаря улучшенным техническим и экономическим показателям. Таким образом, применение поликарбоксилатных суперпластификаторов не только улучшает технические характеристики бетона, но и существенно повышает экономическую эффективность производства, что делает их предпочтительным выбором в современных строительных технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев Б.В., Ин Иен-лян С., Кузнецова Т.В. Цементы и бетоны – тенденции развития. М.: Научный мир, 01 . 136 с.
2. Гусев Б.В. Перспективные технологии при производстве сборного железобетона. Ижевск: Издательский дом «КИТ», 015. 05 с.
3. Тарасов В.Н., Лебедев В.С. Отечественные поликарбоксилатные суперпластификаторы производства ООО «НПП «Макромер» для бетона, гипса и строительных смесей // Бетон и железобетон. 015. № 1. С. 58-60.
4. Liu J., Ran Q., Miao C., Qiao M. Effects of Grafting Densities of Comb-Like Copolymer on the Dispersion Properties of Concentrated Cement Suspensions. *Materials Transactions*. 2012. Vol. 53. P. 553-558.
5. Гусев Б.В., Петрунин С.Ю. Кавитационное диспергирование углеродных нанотрубок и модифицирование цементных систем // Нанотехнологии в строительстве. 2014. № 6. С. 50-57.
6. Долгарев В.А., Долгарев А.В., Тарасов В.Н., Лебедев В.С. Новые отечественные поликарбоксилаты для монолитных бетонов на основе гипсового вяжущего // Технологии бетонов. 015. № 9-10. С. 13-15.
7. Вовк А.И. Добавки на основе отечественных поликарбоксилатов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 01 . № 9. С. 31-33.
8. Witt J., Plank J. A Novel Type of PCE Possessing Silyl Functionalities. 10th CANMET/ACI Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete (Proceedings). Prague. 2012. P. 57-70.

9. Патент 469975 РФ МПК C04B 4/ 6. Поликарбоксилатная пластифицирующая добавка для бетона, строительных растворов и сухих строительных смесей и способ ее получения (варианты) / В.Н. Тарасов, В.С. Лебедев, 01 . Бюл. № 35.

10. Plank J., Sachsenhauser B. Impact of Molecular Structure on Zeta Potential and Absorbed Conformation of α -Allyl- ω -Methoxypolyethylene Glycol - Maleic Anhydride Superplasticizers. Journal of Advanced Concrete Technology. 20067. Vol. 47 P. 233-239

REFERENCES

1. Gusev B.V., In Ien-lyan S., Kuznetsova T.V. Tsementy i betony – tendentsii razvitiya [Cement and concrete – trends] Moscow: Nauchnyy mir Publ., 2012. 136 p.

2. Gusev B.V. Perspektivnye tehnologii pri proizvodstve sbornogo zhelezobetona [Advanced technologies in the production of precast concrete] Izhevsk: Publishing house «KIT», 2015. 205 p.

3. Tarasov V.N., Lebedev V.S. Otechestvennye polikarboksilatnye superplastifikatory proizvodstva OOO «NPP «Makromer» dlya betona, gipsa i stroitel'nykh smesey [Domestic polycarboxylate superplasticizers production “NPP Macromer” for concrete, plaster and mortar]. Beton i zhelezobeton. 2015. No 1, pp. 58-60.

4. Liu J., Ran Q., Miao C., Qiao M. Effects of Grafting Densities of Comb-Like Copolymer on the Dispersion Properties of Concentrated Cement Suspensions. Materials Transactions. 2012. Vol. 53. pp. 553-558.

5. Gusev B.V., Petrunin S.Ju. Kavitacionnoe dispergирование uglerodnykh nanotrubok i modifizirovanie cementnykh system [Cavitation dispersion of carbon nanotubes and modification of cement system] Nanotekhnologii v stroitel'stve. 2014. No 6. pp. 50-57.

6. Dolgarev V.A., Dolgarev A.V., Tarasov V.N., Lebedev V.S. Novye otechestvennye polikarboksilaty dlja monolitnykh betonov na osnove gipsovogo vjzhushhego [New domestic polycarboxylate for monolithic concrete on the basis of gypsum binder] Tehnologii betonov. 2015. No 9-10. pp. 13-15.

7. Vovk A.I. Dobavki na osnove otechestvennykh polikarboksilatov [Additives based on domestic polycarboxylates] Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. 2012. No 9. pp. 31-33.

8. Witt J. Plank J. A Novel Type of PCE Possessing Silyl Functionalities. 10th CANMET/ACI Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete (Proceedings). Prague. 2012. P. 57-70.

9. Tarasov V.N., Lebedev V.S. Patent RF 2469975 IPC C04B 24/26. Polikarboksilatnaja plastificirujushhaja dobavka dlja betona, stroitel'nykh rastvorov i suhix stroitel'nykh smesey i sposob ee poluchenija (varianty) [Polycarboxylate plasticising additive for concrete, building mortars and dry construction mixes and method of its production (versions)] 2012. Byul. No 35.

10. Plank J., Sachsenhauser B. Impact of Molecular Structure on Zeta Potential and Adsorbed Conformation of α -Allyl- ω -Methoxypolyethylene Glycol - Maleic Anhydride Superplasticizers. Journal of Advanced Concrete Technology. 20067. Vol. 47 P. 233-239.