

Дорожный бетон нового поколения — интеграция самоуплотнения и повышенной физико-механической стойкости

УДК 691.542

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0025>

Номер статьи: C0025

Титова Тамила Семеновна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
первый проректор — проректор по научной работе, зав. кафедрой «Техносферная и
экологическая безопасность»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1558-5811

titova@pgups.ru

Соловьева Валентина Яковлевна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Инженерная химия и естествознание»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1571-2027

9046185117@mail.ru

Степанова Ирина Витальевна

канд. техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
кафедра «Инженерная химия и естествознание», доцент

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2753-4649

ivstepanova88@mail.ru

Аннотация. Показано, что создание инновационного бетона, обладающего улучшенным набором физико-механических показателей, достигается целенаправленным воздействием на бетонную систему при помощи комплексной химической добавки, одновременно обладающей эффектом суперпластификации, стабилизирующим и реакционно-активным действия. Создание бетона для дорожных покрытий, отличающегося повышенными показателями прочности, устойчивости к трещинообразованию с раннего возраста до проектных значений и далее достигается подбором компонентов определенной природы при создании комплексной химической добавки, влияющей на протекание химических процессов внутри бетонной системы, обеспечивая формирование прочной структуры бетона. Установлено, что повышение морозостойкости, химической стойкости, водонепроницаемости усиливает добавление в модифицированную бетонную смесь воздухововлекающей добавки, что создает бетон химически высокостойким, повышенной прочности, устойчивости к трещинообразованию и морозостойкости.

Ключевые слова: дорожный бетон, химическая добавка, поликарбоксилатные полимеры, нанодисперсии, надежность, морозостойкость, трещиностойкость.

Next-generation road concrete — integration of self-compacting and increased physical and mechanical resistance

Titova Tamila

Dr. tech. Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
First Vice-Rector - Vice-Rector for Research, Head of the Department of Technosphere and
Environmental Safety
Saint Petersburg, Russia
titova@pgups.ru

Solovieva Valentina Yakovlevna

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering,
Head of the Department of Engineering Chemistry and Natural Science
Saint Petersburg, Russia
9046185117@mail.ru

Stepanova Irina Vitalievna

Ph.D. Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Department of Engineering Chemistry and Natural Science, Associate Professor
St. Petersburg, Russia
ivstepanova88@mail.ru

Abstract. It has been demonstrated that the creation of innovative concrete with an improved set of physical and mechanical properties is achieved by targeted manipulation of the concrete system using a complex chemical additive that simultaneously exhibits superplasticizing, stabilizing, and reactive properties. The creation of concrete for road surfaces characterized by increased strength and crack resistance from an early age to design values and beyond is achieved by selecting specific components when creating a complex chemical additive that influences the chemical processes within the concrete system, ensuring the formation of a strong concrete structure. It has been established that the addition of an air-entraining admixture to the modified concrete mixture enhances frost resistance, chemical resistance, and water resistance, resulting in concrete with high chemical resistance, increased strength, crack resistance, and frost resistance.

Keywords: road concrete, chemical additive, polycarboxylate polymers, nanodispersions, reliability, frost resistance, crack resistance.

Введение

Транспортные магистрали — основа современной экономики, от которых зависит развитие городов и связность регионов. Для этого требуются надежные и долговечные дорожные покрытия, создание которых возможно при использовании инновационного бетона, от которого сегодня требуется не просто прочность, а целый комплекс свойств: устойчивость к образованию трещин, стойкость к экстремальным температурам, воздействию противогололедных реагентов, а также идеальная ровность и способность стать основой для интеллектуальных систем [1-5]. Именно созданию такого высокотехнологического материала — по-настоящему «умного» и сверхнадежного

посвящено научное исследование, ключевые результаты которого представлены в данной статье.

Создание инновационного бетона, для верхнего дорожного покрытия возможно в результате проектирования его основных физико-механических показателей:

- для обеспечения быстрого и качественного проведения строительных работ требуется бетон с улучшенными реологическими свойствами;
- высокими показателями прочности на сжатие, которые должны соответствовать классу В45 и выше, чтобы обеспечить устойчивость покрытия к повышенным механическим нагрузкам от транспорта;
- бетон должен обладать исключительной механической прочностью на изгиб, как в раннем возрасте (1 – 7 суток), которая обеспечивает скорость строительства, качество выполнения операций и предотвращение дефектов (образования трещин) на этапе твердения, так и проектном возрасте (28 суток и далее), которая обеспечивает надежность, долговечность и безопасность дорожного покрытия;
- бетон должен обладать повышенной устойчивостью к истиранию, так как поверхность покрытия подвергается абразивному воздействию шипованной резины, кроме этого, бетон должен отличаться повышенной устойчивостью к внешним негативным воздействиям, в том числе воздействию осадков, что достигается высокой прочностью на изгиб и деформативностью.

Решение указанных задач возможно в результате целенаправленного химического воздействия на бетонную систему при помощи новой химической добавки.

Основой добавки являются ПАВ на основе поликарбоксилатных полимеров, которые обеспечивают повышение устойчивости бетона к трещинообразованию в возрасте 1-7 суток, что является критически важным моментом для технологии строительства и определяет возможность снятия боковой опалубки и нарезки температурно-усадочных швов.

В качестве следующего компонента добавки использовали аминоксодержащий полимер, который оказывает положительное влияние на повышение связности высокоподвижной самоуплотняющейся бетонной смеси, используемой при создании дорожного бетона с целью получения покрытия повышенной ровности с некоторой шероховатостью, обеспечивающей хорошее сцепление колеса с поверхностью дорожного покрытия.

В качестве аминоксодержащего компонента использовали пропилендиамин, образующий контакт с катионами кальция, входящими в состав минералов портландцемента и гидратных фаз, формируя прочную структуру, оказывая положительное влияние на физико-механические характеристики бетона.

Для повышения реакционной активности создаваемой добавки в качестве дополнительного компонента вводили нанодисперсии диоксида кремния, SiO_2 , размером ($10^{-9} \dots 10^{-7}$) м, присутствие которых обеспечивает взаимодействие с первоначально образованными гидратными фазами в бетонной системе, повышая химическую устойчивость бетона, а также его надежность и долговечность [6-12].

Для дополнительного повышения морозостойкости использовали воздухововлекающую добавку, на основе древесной смолы, нейтрализованной едким натром с техническим названием СНВ в виде 5% водного раствора [13-16].

Методика исследований

Оценку эффективности и совместимости исследуемых компонентов добавки проводили относительно контрольного бетона следующего состава: портландцемент класса I 42,5Н – 540 кг/м³; песок по ГОСТ 8736-2014 средней крупности — 700 кг/м³; щебень по ГОСТ 8267-93 с максимальной крупностью зерна 10 мм — 860 кг/м³; В/Ц = 0,56. Эффективность компонентов добавки оценивали по распылу конуса по ГОСТ Р 59715-2022 и прочностным характеристикам возрасте 7 суток, по ГОСТ 10180-2012.

Результаты проведенных исследований по оценке эффективности компонентов добавки представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Оценка эффективности компонентов добавки

№ п/п	Проектный класс бетона, В	Расход материалов на 1 м³ бетонной смеси, кг						Расплав нормального конуса, см	Прочность, (возраст 7 суток), МПа		Коэффициент трещиностойкости, К _{тр} . = R _{изг.} /R _{сж.}
		ПЦ	Компоненты добавки, % от массы цемента (кг)				В, л (В/Ц)		На сжатие	На растяжение при изгибе	
			Поликарбоксилатный полимер №1	Поликарбоксилатный полимер №2	Пропилендиамин	Нанодисперсии, SiO ₂					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	В45	540	контрольный состав				300	38	40,6	4,7	0,116
			-	-	-	-	(0,56)				
2	В45	540	0,6	-	-	-	227 (0,42)	54	46,7	5,4	0,116
3	В45	540	0,8	-	-	-	227 (0,42)	58	46,7	5,4	0,115
4	В45	540	1,0	-	-	-	227 (0,42)	58	47,0	5,4	0,115
5	В45	540	0,8	0,4	-	-	227 (0,42)	61	47,9	5,65	0,118
6	В45	540	0,8	0,6	-	-	227 (0,42)	65	49,1	5,9	0,12
7	В45	540	0,8	0,8	-	-	227 (0,42)	66	49,6	5,9	0,12
8	В45	540	0,8	0,6	0,3	-	227 (0,42)	66	52,1	6,25	0,12
9	В45	540	0,8	0,6	0,5	-	227 (0,42)	68	54,1	6,5	0,12
10	В45	540	0,8	0,6	0,7	-	227 (0,42)	69	54,4	6,5	0,12
11	В45	540	0,8	0,6	0,5	0,4	227 (0,42)	69	55,7	6,7	0,121
12	В45	540	0,8	0,6	0,5	0,6	227 (0,42)	70	57,6	7,0	0,123
13	В45	540	0,8	0,6	0,5	0,8	227 (0,42)	70	58,0	7,1	0,123

Результаты экспериментальных исследований показали, что совместное присутствие поликарбоксилатных полимеров эффективно, они обеспечивают эффект суперпластификации, повышая подвижность бетонной смеси на 71%. Рост прочности на изгиб превышает рост прочности на сжатие, что, по-видимому, является результатом образования сложных полимерных цепей.

Наличие полос поглощения в области 1346–1240 см⁻¹ на ИК-спектрах подтверждают теоретическое предположение о взаимосвязи двух полимеров. Следующий компонент добавки, представленный пропилендиамином повышает прочность на сжатие и на растяжение при изгибе в одинаковой степени, возможно, в результате упрочнения структуры бетона при ее формировании, что обусловлено образованием новых контактов (по данным ИК-спектроскопических исследований) в области (600–610) см⁻¹ между атомами азота аминсодержащих углеводородов с катионом Ca²⁺ гидроксида кальция или гидросиликатов кальция.

Нанодисперсии диоксида кремния проявили хорошую совместимость со всеми используемыми компонентами создаваемой добавки: дополнительно увеличили подвижность бетонной смеси, расплыв конуса составил 70 см, что соответствует марке РК2 в соответствии с ГОСТ Р59714-2022, повысилась устойчивость к трещинообразованию, что подтверждается увеличением коэффициента трещиностойкости, $K_{тр.} = R_{изг.}/R_{сж.}$ до значения 0,123, который выше, чем у контрольного состава на 7,0%, для высокопрочного бетона — это достаточно высокий показатель, особенно, в раннем возрасте, что повышает надежность проведения строительных работ.

На основании полученных положительных результатов определено рациональное количество каждого компонента, входящего в состав создаваемой комплексной химической добавки.

Состав комплексной химической добавки, мас. %:

- водный раствор поликарбоксилатного полимера №1, $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = (6,0 - 7,0)$	32,0
- водный раствор поликарбоксилатного полимера №2, $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,5$	24,0
- водный раствор пропилендиамина с плотностью $\rho = 0,97 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 9,5$	20,0
- водный раствор золя кремниевой кислоты, содержащей нанодисперсии SiO ₂ с плотностью $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 3,5$	24,0

Результаты по оценке рационального количества добавки указаны в Таблице 2.

При использовании КХД наилучшие результаты по показателям удобоукладываемости и прочности достигаются при ее введении в бетонную смесь в количестве (0,8 – 1,2)% от массы цемента, совместное присутствие рассматриваемых компонентов является благоприятным, придавая добавке эффект суперпластификации и стабилизации, что подтверждается увеличением подвижности бетонной смеси при уменьшении В/Ц отношения.

Как указывалось выше, бетон для дорожных покрытий эксплуатируется в достаточно суровых условиях, постоянно подвергается интенсивным механическим, а также внешним негативным и температурным воздействиям.

Таблица 2

Оценка эффективности комплексной химической добавки

№ п/п	Проектный класс бетона, В	Расход основных компонентов на 1 м³ бетонной смеси, кг			Удобукладываемость (расплав конуса), см	Прочность, МПа (возраст 7 суток)		Коэффициент трещиностойкости, $K_{тр.} = R_{изг.}/R_{сж.}$
		ПЦ	КХД*, % от массы цемента	Вода (В/Ц)		на сжатие	на растяжение при изгибе	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	B45	540	-	300 (0,56)	38	40,6	4,7	0,116
2	B45	540	0,4	248 (0,46)	59	48,0	5,7	0,118
3	B45	540	0,6	232 (0,43)	70	54,0	6,5	0,120
4	B45	540	0,8	221 (0,41)	72	60,0	7,4	0,123
5	B45	540	1,0	216 (0,40)	74	62,0	7,8	0,126
6	B45	540	1,2	210 (0,39)	74	60,0	7,7	0,124
7	B45	540	1,4	210 (0,39)	74	57,0	6,9	0,122

*КХД - разработанная комплексная химическая добавка

С целью повышения надежности и долговечности бетона целесообразно дополнительно рассмотреть использование воздухововлекающей добавки.

В качестве воздухововлекающей добавки использовали 5% раствор СНВ (смолы нейтрализованной воздухововлекающей) в количестве 0,05% от массы цемента, которую вводили непосредственно в воду затворения, чтобы не вызвать коагуляцию разработанной комплексной химической добавки. Комплексные физико-механические характеристики дорожного бетона (Таблица 3) показали, что бетон целесообразно использовать для дорожных покрытий.

Комплексные физико-механические исследования дорожного бетона проектного возраста показали, что прочность на растяжение при изгибе соответствует классу В_т9,9 и морозостойкость марки F₂400.

**Комплексные физико-механические показатели
модифицированного бетона**

ПЦ, кг/м ³	КХД, % от массы цемента	Добавка СНВ, % от массы цемента	В, л (В/Ц)	Удобукладываемость (расплав конуса), см	Воздухововлечение, %	Прочность на сжатие, МПа/фактический класс бетона, В	Прочность на растяжение при изгибе, МПа/фактический класс бетона, В _{тб}	Коэффициент трещиностойкости, $K_{тр.} = R_{изг.}/R_{сж.}$	Марка по морозостойкости, F ₂	Марка по водонепроницаемости, W	Коэффициент химической стойкости, K _{х.с.}
540	-	-	0,56	38	2,9	57/В45	6,5/ В _{тб} 5,2	0,114	200	8	0,43
540	1,0	-	0,40	74	3,6	85/В68	12,3/В _{тб} 9,9	0,145	300	12	0,87
540	1,0	0,05	0,39	76	4,7	83/В66	12,0/В _{тб} 9,6	0,144	400	14	0,89

Нанодисперсии диоксида кремния образуют новые гидратные фазы типа низкоосновного гидросиликата кальция — окенита $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, для которого межплоскостное расстояние $d/n = (3,56; 3,07; 3,05; 2,93; 1,80) \cdot 10^{-10}$ м. Окенит кристаллизуется в виде длинных волокон, твердость которого равна 5 [17-20].

Выводы

Научно-экспериментальные исследования показали перспективность использования разработанной комплексной химической добавки в сочетании с воздухововлекающей добавкой для создания самоуплотняющегося бетона с улучшенными физико-механическими характеристиками, который целесообразно рекомендовать к использованию при строительстве транспортных магистралей.

Список литературы

1. Svatovskaya L., Urov O., Mikhailova K., Supeliuk T. Information assessment of natural geosystem preservation in geoconstruction by improving the quality of concrete. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 405-411. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42
2. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_35
3. Касаткин С.П., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Кузнецов Д.В., Синицин Д.А. Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности. // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Т. 14. № 6. С. 493-500. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500
4. Solovieva V., Stepanova I., Ershikov N., Soloviev D. Improving the properties of composite materials for civil engineering. // E3S Web of Conferences. 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018. 2019. С. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102015
5. Сватовская Л.Б. Модифицирование поверхности минерального искусственного камня. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VI

Международной научно-практической интернет-конференции. 2019. С. 16-19. <https://elibrary.ru/TOMVPU>

6. Сватовская Л.Б. Возможное применение периодического закона Д.И. Менделеева в строительной деятельности. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VI Международной научно-практической интернет-конференции. 2019. С. 5-12. <https://elibrary.ru/KKOHYQ>

7. Соловьева В.Я. и др. Химическая экспертиза строительных материалов и изделий. / В.Я. Соловьева, Л.Л. Масленникова, М.С. Абу-Хасан, М.В. Шершнева, И.В. Степанова, Д.В. Соловьев, А.С. Сахарова, М.М. Байдарашвили, Н.А. Шредник. Санкт-Петербург, 2023. <https://elibrary.ru/LRGALS>

8. Сахарова А.С., Байдарашвили М.М., Петряев А.В., Мальчевская К.С. Современные исследования в области дорожного строительства с учетом геоэкологических вызовов. // Августин Бетанкур: от традиций к будущему инженерного образования. Материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 181-185. <https://elibrary.ru/UPUDOW>

9. Сватовская Л.Б. и др. Инновационные естественно-научные технические решения в строительной деятельности / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, М.В. Шершнева, М.С. Абу-Хасан, Л.Л. Масленникова, М.М. Байдарашвили // ПЕРСПЕКТИВЫ БУДУЩЕГО В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ. Сборник тезисов национальной научно-технической конференции. 2017. С. 108-109. <https://elibrary.ru/YVXXOH>

10. Беленцов Ю.А., Казанская Л.Ф., Докшина Е.А. Роль однородности материала в точности определения прочностных характеристик высокопрочных бетонов. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22. № 2. С. 499-508. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508

11. Казанская Л.Ф., Майер В.А., Сибгатуллин Э.С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21. № 4. С. 931-943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

12. Соловьев Д.В. Высокоэффективный бетон для дорожных покрытий. // Значение трудов Д.И. Менделеева в современных инновационных решениях. сборник трудов X международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 120-126. <https://elibrary.ru/LOJXVE>

13. Соловьев Д.В. Физико-химические основы создания высокоэффективного бетона для дорожных покрытий. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции. 2020. С. 42-46. <https://elibrary.ru/UHBEVU>

14. Джилкибаев Е.С., Бекенов Р.М., Кулымбетова С., Шоман Г.Н. Воздействие колес автомобиля на дорожные покрытия. // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2016). Сборник статей VIII Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор Е.В. Агеев. 2016. С. 80-85. <https://elibrary.ru/XAURFT>

15. Зайченко Н.М., Назарова А.В., Соколова А.А. Цементобетонные дорожные покрытия из самоуплотняющихся бетонных смесей. // Строитель Донбасса. 2018. № 1 (2). С. 41-48. <https://elibrary.ru/OOJKAS>

16. Мюллер М., Хорст-Михаел Л. Долговечные бетонные дорожные покрытия с использованием различных вяжущих веществ в верхнем и нижнем слоях бетона. // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. сборник материалов международной научной конференции. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». 2017. С. 696-703. <https://elibrary.ru/XSNHZD>

17. Хвостова А.А., Антоненко Н.Н., Орехов С.А., Дергунов С.А. Современные дорожные покрытия. // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики. материалы Международной научно-методической конференции. Самара–Оренбург, 2022. С. 13. <https://elibrary.ru/YDYNBS>

18. Крамар Л.Я., Иванов И.М., Шулдяков К.В., Мордовцева М.В. Влияние суперпластификаторов на микроструктуру и упругие свойства бетона. // Строительные материалы. 2022. № 10. С. 17-24. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-17-24

19. Крамар Л.Я., Мордовцева М.В., Погорелов С.Н., Иванов И.М. Структура цементного камня с комплексными добавками и ее влияние на деформационные свойства бетонов. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22. № 3. С. 35-45. DOI: 10.14529/build220304

20. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В. Функциональные наполнители полимерных композиционных материалов. // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. № 1 (12). С. 41-44. <https://elibrary.ru/DGXBVU>

References

1. Svatovskaya L., Urov O., Mikhailova K., Supeliuk T. Information assessment of natural geosystem preservation in geoconstruction by improving the quality of concrete. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 405-411. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42

2. Soloviova V., Stepanova I., Soloviov D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Springer Nature, 2020. С. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_35

3. Kasatkin S.P., Soloviova V.Ya., Stepanova I.V., Kuznetsov D.V., Sinitsyn D.A. Highly effective nanomodified concrete of increased strength and durability. // Nanotechnology in Construction: Scientific Online Journal. 2022. Vol. 14. No. 6. Pp. 493-500. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500

4. Soloviova V., Stepanova I., Ershikov N., Soloviov D. Improving the properties of composite materials for civil engineering. // E3S Web of Conferences. 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018. 2019. С. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102015

5. Svatovskaya L.B. Modification of the surface of artificial mineral stone. // Innovative technologies in construction and geoecology. Proceedings of the VI International scientific and practical Internet conference. 2019. pp. 16-19. <https://elibrary.ru/TOMVPU>

6. Svatovskaya L.B. Possible application of D.I. Mendeleev's periodic law in construction activities. // Innovative technologies in construction and geoecology. Proceedings of the VI International scientific and practical Internet conference. 2019. pp. 5-12. <https://elibrary.ru/KKQXYQ>

7. Solovyova V.Ya. et al. Chemical Expertise of Construction Materials and Products. / V.Ya. Solovyova, L.L. Maslennikova, M.S. Abu-Hasan, M.V. Shershneva, I.V. Stepanova, D.V. Soloviev, A.S. Sakharova, M.M. Baidarashvili, N.A. Shrednik. Saint Petersburg, 2023.

8. Sakharova A.S., Baidarashvili M.M., Petryaev A.V., Malchevskaya K.S. Modern Research in Road Construction Taking into Account Geoecological Challenges. // Augustin Betancourt: From Traditions to the Future of Engineering Education. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2018. pp. 181-185. <https://elibrary.ru/UPUDOW>

9. Svatovskaya L.B. and others. Innovative Natural Science Engineering Solutions in Construction Activities / L.B. Svatovskaya, V.Ya. Solovyova, M.V. Shershneva, M.S. Abu-Hasan, L.L. Maslennikova, M.M. Baidarashvili // FUTURE PROSPECTS IN THE EDUCATIONAL PROCESS. Collection of abstracts of the national scientific and technical conference. 2017. Pp. 108-109. <https://elibrary.ru/YVXXOH>

10. Belentsov Yu.A., Kazanskaya L.F., Dokshina E.A. The role of material homogeneity in the accuracy of determining the strength characteristics of high-strength concrete. // Bulletin of the St. Petersburg Transport University. 2025. Vol. 22. No. 2. Pp. 499-508. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508

11. Kazanskaya L.F., Mayer V.A., Sibgatullin E.S. Interrelationship of factors determining the durability of concrete. // Bulletin of the St. Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21. No. 4. Pp. 931-943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

12. Soloviov D.V. High-performance concrete for road surfaces. // The Importance of D.I. Mendeleev's Works in Modern Innovative Solutions. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2024. Pp. 120-126. <https://elibrary.ru/LOJXVE>
13. Soloviov D.V. Physicochemical Foundations of Creating High-Performance Concrete for Road Surfaces. // Innovative Technologies in Construction and Geoecology. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Internet Conference. 2020. Pp. 42-46. <https://elibrary.ru/UHBEBU>
14. Dzhilkibaev E.S., Bekenov R.M., Kulymbetova S., Shoman G.N. Impact of vehicle wheels on road surfaces. // Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2016). collection of articles from the VIII International scientific and technical conference. Editor-in-chief E.V. Ageyev. 2016. pp. 80-85. <https://elibrary.ru/XAURFT>
15. Zaychenko N.M., Nazarova A.V., Sokolova A.A. Cement concrete road surfaces made of self-compacting concrete mixtures. // Stroitel Donbassa. 2018. No. 1 (2). pp. 41-48. <https://elibrary.ru/OOJKAS>
16. Müller M., Horst-Michael L. Durable concrete road pavements using different binders in the top and bottom layers of concrete. // Integration, partnership and innovation in construction science and education. Collection of materials of the international scientific conference. National Research Moscow State University of Civil Engineering. 2017. pp. 696-703. <https://elibrary.ru/XSNHZZ>
17. Khvostova A.A., Antonenko N.N., Orekhov S.A., Dergunov S.A. Modern road pavements. // Science and education: current issues of theory and practice. Proceedings of the International scientific and methodological conference. Samara–Orenburg, 2022, p. 13. <https://elibrary.ru/YDYNBS>
18. Kramar L. Ya., Ivanov I. M., Shuldyakov K. V., Mordovtseva M. V. Influence of superplasticizers on the microstructure and elastic properties of concrete. // Construction materials. 2022, no. 10, pp. 17–24. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-17-24
19. Kramar L. Ya., Mordovtseva M. V., Pogorelov S. N., Ivanov I. M. Structure of cement stone with complex additives and its influence on the deformation properties of concrete. // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2022. Vol. 22. No. 3. Pp. 35-45. DOI: 10.14529/build220304
20. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V. Functional fillers of polymer composite materials. // Polymers in Construction: Scientific Online Journal. 2024. No. 1 (12). Pp. 41-44. <https://elibrary.ru/DGXBVU>