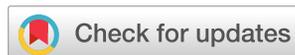


Научная статья
УДК 625.73
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>
EDN: UHVRPO



РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦЕОЛИТА ТАТАРСКО-ШАТРАШАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

О.Н. Ильина

Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Россия
ilinaon@inbox.r, <https://orcid.org/0009-0009-8637-7194>

АННОТАЦИЯ

Введение. Набранная динамика дорожного строительства, активное совершенствование отечественных дорожных конструкций и технологий, модернизация производственной базы позволяет сформировать всеобъемлющий устойчивый транспортный каркас страны, что оказывает импульс всей экономике Российской Федерации. Одним из экономически и технологически выгодных решений для этого является разработка и устройство дорожных конструкций с применением цеолита – пуццолановой добавки. Анализ российских и зарубежных источников свидетельствует о том, что пуццолановые добавки улучшают физико-механические свойства дорожно-строительных материалов. Цель работы – разработка конструкций дорожных одежд с использованием цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработка дорожно-строительных материалов с применением цеолита, а именно для слоев оснований – местных минеральных материалов, обработанных портландцементом и цеолитом, для слоев покрытий – теплого асфальтобетона с применением цеолита; конструирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения.

Материалы и методы. Экспериментальные лабораторные исследования материалов выполнены в соответствии с ГОСТ 23558, ГОСТ Р 70396, ГОСТ Р 58406.8, ГОСТ Р 58406.9, ГОСТ 9128, ГОСТ 12801. Расчет конструкций дорожных одежд осуществлен в программном комплексе Кредо Радон по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости, сопротивлению при изгибе, статической нагрузке, морозоустойчивости, дренающему слою для климатических условий, характерных Республике Татарстан, по ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818.

Результаты. В результате исследований определены физико-механические показатели образцов дорожно-строительных материалов с использованием цеолита, соответствующие нормативным требованиям. Выполнено конструирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита в программном комплексе Кредо Радон. Предложены конструктивные поперечные профили автомобильных дорог IV и V категорий с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения. Использование разработанных материалов и дорожных конструкций в настоящее время улучшит экономику, рациональное природопользование региона и в целом даст возможность повысить качество жизни в городах и населённых пунктах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цеолит, конструкции дорожных одежд, теплый асфальтобетон, обработанные минеральные материалы

Статья поступила в редакцию 30.11.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 20.12.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Ильина О.Н. Разработка конструкций дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 798-807. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

© Ильина О.Н., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>
EDN: UHVRPO

DEVELOPMENT OF ROAD PAVEMENT STRUCTURES USING ZEOLITE OF THE TATARSKO-SHATRASHANSKOE DEPOSIT

Olga N. Ilina

Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian
ilinaon@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8637-7194>

ABSTRACT

Introduction. The growing dynamics of road construction, the active improvement of domestic road structures and technologies, and the modernization of the production base will make it possible to form a comprehensive sustainable transport framework for the country, which will provide an impact to the entire economy of the Russian Federation. One of the economically and technologically advantageous solutions for this is the development and construction of road structures using zeolite - pozzolanic additive. The analysis of Russian and foreign sources indicates that pozzolanic additives improve the physical and mechanical properties of road building materials. The purpose of the work is to develop road pavement structures using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit. To achieve this purpose, the tasks such as the development of road building materials using zeolite (local mineral materials treated with Portland cement and zeolite are used for base layers, warm asphalt concrete with zeolite is used for coating layers), the design and calculation of road pavements using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit were solved.

Materials and methods. The experimental laboratory studies of materials in accordance with GOST 23558, GOST R 70396, GOST R 58406.8, GOST R 58406.9, GOST 9128, GOST 12801 were carried out. The calculation of road pavement structures in the Credo Radon software package for permissible elastic deflection, shear resistance, bending resistance, static load, frost resistance, drainage layer for climatic conditions typical of the Republic of Tatarstan, according to PNST 265, GOST R 58818 was carried out.

Results. As a result of the research, the physical and mechanical properties of samples of road building materials using zeolite, which correspond to regulatory requirements were determined. The design and calculation of road pavements using zeolite in the Credo Radon software package was carried out. Structural transverse profiles of highways of categories IV and V using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit have been proposed. The use of developed materials and road structures will currently improve the economy, rational environmental management of the region and, in general, provide an opportunity to improve the quality of life in cities and towns by successfully completing the five-year road activity plan.

KEYWORDS: zeolite, pavement structures, warm asphalt concrete, treated mineral materials

The article was submitted 30.11.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Ilina O.N. Development of road pavement structures using zeolite of the Tatar-Shatrashanskoe deposit. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023; 20 (6): 798-807. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

© Ilina O. N., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы отечественный дорожно-транспортный комплекс сделал значительный шаг вперед: увеличивается дорожная сеть по всей стране, строятся скоростные магистрали, планомерно снижается уровень аварийности, обновляется городской пассажирский транспорт, повышается уровень обучающихся программ высшего и дополнительного образования для профильных специалистов, совершенствуется нормативная база, дорожные конструкции и технологии. Так, за период 2022–2027 годы запланирован ремонт 110 тыс. км дорог, включая 650 мостовых сооружений, строительство и реконструкция более 4 тыс. км автомобильных дорог, ещё 3 тыс. км дорог расширят до четырех полос движения, что позволит сформировать всеобъемлющий устойчивый транспортный каркас страны. А это в свою очередь даст импульс всей экономике Российской Федерации.

Одним из экономически выгодных и технологически возможных решений для достижения указанных целей планирования является разработка и устройство дорожных конструкций с применением цеолита – пуццолановой добавки. Анализ российских и зарубежных источников свидетельствует о том, что пуццолановые добавки улучшают физико-механические свойства дорожно-строительных материалов [1, 2, 3, 4, 5]. Пуццолановые добавки являются минеральными природными добавками вулканического и осадочного происхождения. Такие добавки применяют в составе комплексного вяжущего, что способствует формированию плотной структуры материала, благодаря чему повышается морозостойкость, стойкость к истиранию, а также наряду с повышением прочностных характеристик и устойчивости материала к различным видам коррозии снижается водопроницаемость, что и определяет его высокую долговечность [6, 7, 8, 9, 10]. Цеолиты – это водные каркасные алюмосиликаты щелочных и щелочноземельных металлов. Алюмосиликатный каркас обеспечивает исключительную прочность и стабильность структуры решетки. Структура минерала образуется из тетраэдров, состоящих из оксидов кремния и алюминия. Каркас заряжен отрицательно, а в полостях находят-

ся молекулы воды и положительно заряженные катионы металлов, которые могут участвовать в ионном обмене с внешней средой¹. Цеолит является «внутренним агентом» по набору прочности бетона, поглощая и удерживая определенное время воду в себе, потом постепенно отдавая ее портландцементу, способствуя его полной гидратации. Это безопасный, эффективный, недорогой и нетоксичный материал.

Одно из крупнейших месторождений цеолитов Российской Федерации – Татарско-Шатрашанское – находится в Республике Татарстан, запасы цеолитсодержащих пород которого оценены по различным категориям в количестве более 100 млн т на площади 450 га. При исследовании месторождения цеолитсодержащих пород определено, что породы представляют собой новый тип цеолитового сырья, принципиально отличный от ранее изученных. Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения – сложная многокомпонентная система переменного состава. Основные породообразующие компоненты этой системы – клиноптилолит, опал-кристобалит-тридимитовая фаза (ОКТ-фаза), глинистые минералы (монтмориллонит), кальцит и кварц – составляют 90–95% от объема породы². ОКТ-фаза и монтмориллонит наряду с цеолитами являются природными сорбентами и характеризуются физико-химическими свойствами (адсорбционными, катионообменными), которые существенно дополняют и расширяют спектр физико-химических показателей породы и в конечном итоге определяют технологические свойства, качество материалов. Цель работы – разработка конструкций дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработка дорожно-строительных материалов, а именно для слоев оснований – минеральных материалов, обработанных портландцементом и пуццолановой добавкой цеолит, для слоев покрытий – теплового асфальтобетона с цеолитом; проектирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения.

¹ Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Под ред. А.В. Якимова, А.И. Булова. Казань: изд-во «Фен» АН РТ, 2001, 176 с.

² Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Там же.

Таблица 1

Химический состав цеолита
Источник: ТУ 2163-001-27860096.

Table 1

Chemical composition of zeolite
Source: TU 2163-001-278600961.

Наименование	Содержание, % масс
SiO_2	не менее 50
SiO_2 аморфный	не менее 21
Al_2O_3	не более 7
Fe_2O_3	не более 3
CaO	не более 17

Таблица 2

Основные физико-механические свойства цеолита
Источник: ТУ 2163-001-27860096.

Table 2

Basic physical and mechanical properties of zeolite
Source: TU 2163-001-278600961.

Наименование показателей	Значение
Содержание глинистых и пылевидных веществ, % не более	2,5
Истинная плотность, г/см ³	1,5–2,4
Механическая прочность, МПа	4,0–7,5
Пористость, %	42–60

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные лабораторные исследования минеральных материалов, обработанных портландцементом и цеолитом, выполнены в соответствии с ГОСТ 23558³. При проведении работ исследованы свойства и составы данных материалов с применением цеолита, а также определены методики исследований. В качестве минеральной части использован местный щебень М400 фракции 0–20 мм ГОСТ 8267, портландцемент ЦЕМ II 42,5 ГОСТ 31108 в количестве 4–5% от массы щебня, цеолит ТУ 2163-001-27860096⁴ фракцией 0–1,25 мм в количестве 5–10% от массы портландцемента, вода техническая ГОСТ 23732 8–10% от массы щебня. Химический состав и основные физико-механические

свойства цеолита представлены в таблицах 1, 2. Изготовление, хранение и испытание образцов обработанных материалов с применением цеолита проводили в соответствии с ГОСТ 10180 [11].

Экспериментальные лабораторные исследования теплого асфальтобетона с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения проведены в соответствии с ГОСТ Р 70396–2022⁵ (ПНСТ 358–2019⁶), ГОСТ Р 58406.8–2019, ГОСТ Р 58406.9–2019, ГОСТ 9128–2013, ГОСТ 12801–98. Использован природный цеолит фракции 0–0,8мм, количество цеолита подобрано опытным путем с учетом анализа предыдущих исследований [5, 12, 13, 14, 15, 16]. Состав асфальтобетонной смеси по массе составил: щебень М1000 – 42,9%; отсев дробления щебня

³ ГОСТ 23558–94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства». М.: Стандартинформ, 2005. 12 с.

⁴ ТУ 2163-001-27860096 «Технические условия. Цеолит активированный». Казань. Дата введения: 05 октября 2016.

⁵ ГОСТ Р 70396–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси теплые асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Общие технические условия». М.: Российский институт Стандартизации, 2022.

⁶ ПНСТ 358–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси теплые асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019.

M1000 – 32,9%; песок природный – 6,3%; минеральный порошок МП – 7,6%; цеолит – 5,5%; битум БНД 70/100 – 4,8% [17]. Расчет конструкций дорожных одежд осуществлен в программном комплексе Кредо Радон по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости, сопротивлению при изгибе, статической нагрузке, морозоустойчивости, дренирующему слою для климатических условий, характерных Республике Татарстан, по ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818 (таблица 3). Расчетные модули упругости конструкционных материалов дорожных одежд: песок мелкий 100 МПа, щебень М400 фракции 0–40 мм, обработанный портландцементом 42,5Н 4% и цеолитом ОАО «Цеолиты Поволжья» 5% от массы портландцемента 600 МПа, асфальтобетон крупнозернистый пористый II марки 2000 МПа, теплый асфальтобетон А16В_п 3000 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате испытания образцов минеральных материалов, обработанных портландцементом и цеолитом, всех заданных составов были получены показатели прочности на сжатие в возрасте 7 и 28 сут в сухом и водонасыщенном состояниях, плотности и водостойкости; определено их соответствие нормативным требованиям ГОСТ 23558. Введение цеолита в количестве 5–10% позволяет улучшить физико-механические показатели обработанного материала. Так, прочность на сжатие увеличивается в 1,08–1,26 раза, водостойкость повышается с 0,90–0,91 до 0,93–0,95, марка по морозостойкости – с F5 до F15 и F25. Опыт-

но-производственное внедрение результатов исследований осуществлено при устройстве основания толщиной 0,20 м на участке автомобильной дороги – съезд к н.п. Кызыл Яшьлерв Пестречинском районе Республики Татарстан. Производство работ проводилось методом «смешения на дороге» с ведущим механизмом ресайклером CAT RM 500 АО «Татавтодор». При определении способа производства работ определяющим фактором явилось наличие у подрядчика смесительного оборудования в виде ресайклера CAT RM 500 и возможности его доставки. Для осуществления опытно-промышленной проверки результатов исследования определен следующий состав: щебень М 400 фракции 0–40 мм, портландцемент ЦЕМ II 42,5 в количестве 4% от массы щебня, цеолит фракцией 0–1,25мм в количестве 5% от массы портландцемента, вода техническая 8% от массы щебня. Эксплуатация и мониторинг экспериментального участка опытного строительства осуществляется с последующим испытанием образцов материала в соответствии с нормативными требованиями (рисунки 1,2). Получены результаты физико-механических показателей материала, все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 23558. При сравнении сметной стоимости традиционного основания автомобильных дорог из привозного щебня М800 и основания из щебня М 400, обработанного комплексным минеральным вяжущим из портландцемента и пуццолановой добавки цеолита, определено, что экономия благодаря применению разработанного материала на 1 км составит 1 819 451 руб. [11].

Таблица 3
Расчетные характеристики дорожных одежд нежесткого типа
Источник: ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818.

Table 3
Design characteristics of non-rigid road pavements
Source: PNST 265, GOST R 58818.

Категория дороги	Тип дорожной одежды	Минимальный требуемый модуль упругости, МПа	Коеф. надежности	Требуемый коэффициент	
				прочности	прочности по критерию сдвигоустойчивости и растяжению при изгибе
IV, IVA-р, IV Б-р	Капитальный	200	0,8–0,9	1,02–1,10	0,87–0,94
IVA-п	Облегченный	150	0,8–0,85	1,02–1,06	0,87–0,90
IVБ-п, V					
V, VA		100	0,77–0,82	0,98–1,02	0,80–0,87



Рисунок 1 – Отбор кернов дорожного основания из щебня М 400, обработанного портландцементом и цеолитом
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Selection of cores of road base from М 400 crushed stone, processed with portland cement and zeolite
Source: compiled by the author.



Рисунок 2 – Керны и кубы разработанного материала, подготовленные для испытания
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Cores and cubes of the developed material, prepared for testing
Source: compiled by the author.

При приготовлении теплых асфальтобетонных смесей минеральные материалы и битум разогревали до 140 °С. Цеолит и минеральный порошок добавляли без разогрева одновременно с введением битума. По истечении времени после смешения можно было наблюдать действие добавки – активное выделение воды из структуры цеолита и вспенивание битума, что способствует повышению обволакиваемости минеральной части битумным вяжущим. Подобран состав теплой асфальтобетонной

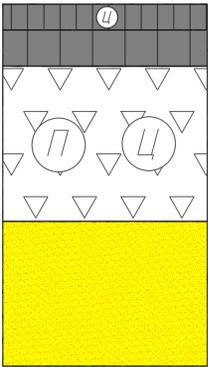
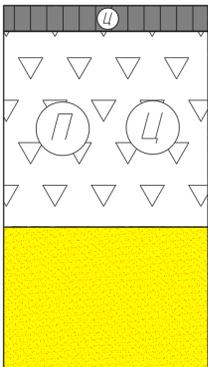
смеси с применением цеолита и определено соответствие исследуемых материалов показателям ГОСТ Р 70396 [17]. Основными преимуществами теплой асфальтобетонной смеси с использованием цеолита перед горячей асфальтобетонной смесью являются: приготовление смеси при пониженных температурах технологических процессов и, соответственно, ресурсосбережение природного газа на 16,8%; повышение ресурса асфальтосмесительных установок при снижении температур и умень-

шение амортизационных расходов; снижение расходов горючих материалов сокращает количество выбросов вредных веществ в окружающую среду; в целом снижение стоимости строительства автомобильных дорог [18,19]. Выполнено сравнение стоимостей исходных материалов для теплой асфальтобетонной смеси с применением цеолита и горячей ас-

фальтбетонной смеси тип Б марки II, исходя из экономии на природном газе и исходных материалах рассчитаны их стоимости материала как на тонну, так и на километр покрытия IV и V категорий, что в целом определяет экономию денежных средств на 1 км для автомобильной дороги IV категории –369 069 руб., V категории 237 258 руб. [17].

Таблица 4
Варианты конструкций дорожных одежд с применением цеолита
Источник: составлено автором

Table 4
Options for road pavement designs using zeolite
Source: compiled by the author.

Наименование слоев и материалов	Схема конструкции дорожной одежды	По результатам расчетов толщины слоев, см		
		IV категории*	IV категории**	V категории***
1. Теплый асфальтобетон А16В _н	 <p style="text-align: right;">**(**)</p>	5	4	4
2. Асфальтобетон крупнозернистый пористый II марки		7	7	-
3. Щебень М400 фракции 0–40 мм, обработанный портландцементом 42,5Н 4% и цеолитом 5% (от массы портландцемента)		20	20	26
4. Песок мелкий	 <p style="text-align: right;">***</p>	28	27	27

* Автомобильные дороги с капитальным типом дорожной одежды, требуемый модуль упругости для IV категории – 200 МПа.

** Автомобильные дороги с облегченным типом дорожной одежды, требуемый модуль упругости для IV категории – 150 МПа.

*** Автомобильные дороги с облегченным типом дорожной одежды, требуемый модуль упругости для V категории – 100 МПа.

Варианты конструкций дорожных одежд с применением цеолита, рассчитанные в программном комплексе Кредо Радон, приведены в таблице 4. Конструктивные поперечные профили автомобильных дорог IV и V категорий с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан представлены на рисунке 3. Конструкции автомобильных дорог должны быть не только прочными и надежными в эксплуатации, но и экологичными и экономичными, особенно по расходу привозных дорогостоящих материалов и энергоресурсов. В связи с актуальностью задачи реализации федеральных и региональных программ по расширению сети дорог с низкой интенсивностью движения и разработке для них типовых альбомов дорожных

конструкций предложенные конструкции также могут быть применены на автомобильных дорогах с низкой интенсивностью движения: подъезды к животноводческим комплексам, фермерским хозяйствам, сельскохозяйственным угодьям, детским оздоровительным лагерям; распределительные дороги, обеспечивающие связь между подъездами и дорогами более высоких категорий. Технология строительства автомобильных дорог с применением цеолита осуществляется при комплексной механизации всего заданного процесса производства работ с использованием современных высокопроизводительных машин и оборудования (ресайклеры, навесные дорожные фрезы, смесительные установки).

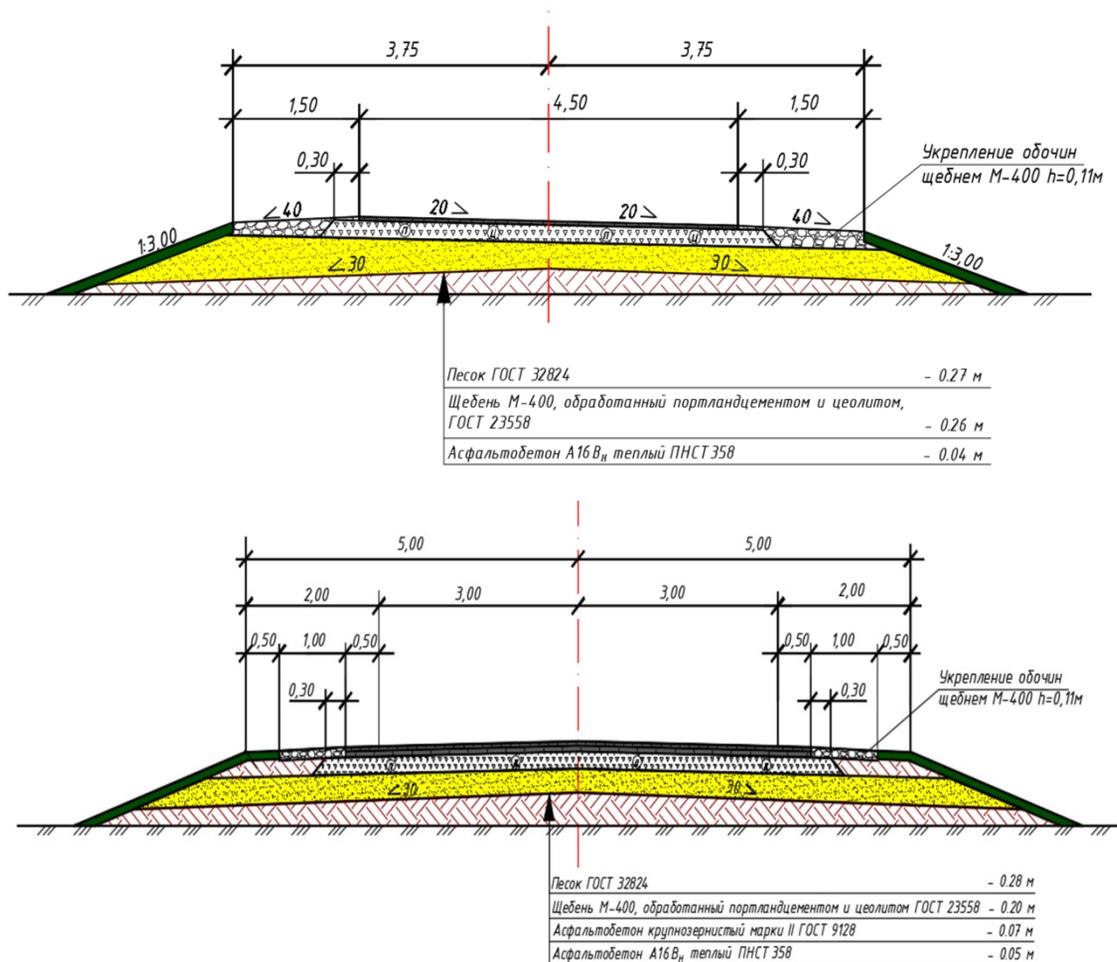


Рисунок 3 – Конструктивные поперечные профили автомобильных дорог с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Structural cross-sections of roads using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit of the Republic of Tatarstan
Source: compiled by the author.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкции дорожных одежд автомобильных дорог IV и V категорий с использованием цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан: в слоях оснований местный обработанный щебень, в слоях покрытий теплый асфальтобетон. Установлено, что введение пуццолановой добавки цеолит позволяет повысить показатели плотности, прочности, водостойкости и морозостойкости материалов. Конструирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита выполнен в программном комплексе Кредо Радон по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости, сопротивлению при изгибе, статической нагрузке, морозоустойчивости, дренажирующему слою для климатических условий, характерных Республике Татарстан, по ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818. Применение разработанных материалов и дорожных конструкций в настоящее время улучшит экономику, рациональное природопользование региона и в целом даст возможность повысить качество жизни в городах и населённых пунктах. Следующий этап работы направлен на дальнейшее проведение промышленной апробации результатов исследований и мониторинг экспериментальных участков автомобильных дорог.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Морозова Н.Н., Кайс Х.А. Свойства природного цеолита для получения высокопрочного мелкозернистого бетона // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 63–68.
2. Николаева Л.А., Копылов В.Е., Буренина О.Н., Попов С.Н., Портягина В.В. Использование модифицированных асфальтобетонов для развития транспортной инфраструктуры горнодобывающих предприятий Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 9. С. 398–404.
3. Mechanical Evaluation of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration Used in Roadbase / Q. Tang, F. Gu, H. Chen [etal.] // *Advances in Civil Engineering*. Vol. 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/5694908>
4. Marinkovic M., Milovic T., Matic B. Zeolite as additive in warm mix asphalt. V International conference Contemporary achievements in civil engineering 21. Subotica, Serbia. 2017. P. 483-490.
5. Береговая Н.Г., Герасименко В.В., Молчанов С.А., Морозов М.М. Перспективы вторичного использования отработанного цеолита типа NAX Оренбургского газохимического комплекса // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10. С. 334–336.
6. Пустовгар А.П. Эффективность применения активированных диатомитов в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 62–64.
7. Сатыбалдиев А.К., Ивчин Д.С. Влияние минеральных добавок на свойства портландцемента // Молодой ученый. 2020. № 4 (294). С. 11–14.
8. Морозова Н.Н., Гуляков Е.Г. Свойства бетона на цеолитсодержащем вяжущем // Известия КГАСУ, 2023. №2 (64). С. 27–39. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27, EDN: LCQWVC
9. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А. Эффективность комплексной минеральной добавки в мелкозернистом самоуплотняющемся бетоне // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3 (48). С. 114–122.
10. Коваль И.В., Калиновская Н.Н., Аль-Муса-ви К.С. Использование минеральных добавок в технологии монолитного бетона и производстве сборного железобетона // Технологии бетонов. 2020. № 11–12 (172–173). С. 25–31.
11. Ильина О.Н., Силкин В.В. Об устройстве дорожных оснований с применением цеолита // Транспортное строительство. 2022. № 4. С. 10–14.
12. Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C., Pérez-Mena V., Cabanillas P., “Reuse of Zeolite By-Products Derived from Petroleum Refining for Sustainable Roads”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 4256989, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4256989>
13. Jan Mikolaj, Frantisek Schlosser, Lubos Remek, Martin Pitoňák, Juraj Šrámek, “Properties of Asphalt Mixtures Using Reclaimed Asphalt Containing Polymer-Modified Binder and Technico economical Considerations of Their Use”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 2030763, 12 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2030763>
14. Zhuolin Li, Junda Ren, Jianping Zhu, Wei Li, Xingsheng Fu, Liying Yang, “Study on the Construction Performance of Zeolite Asphalt Mixture Based on Macro-Micro Scale”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID 4137321, 21 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4137321>
15. Zhanping You, Meor O. Hamzah, Hainian Wang, Aboelkasim Diab, Qingli Dai, “Advanced Pavement Materials for Sustainable Transportation Infrastructure”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, Article ID 3175651, 1 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3175651>
16. Haibin Deng, Deyi Deng, Yinfei Du, Xinmin Lu, “Using Lightweight Materials to Enhance Thermal Resistance of Asphalt Mixture for Cooling Asphalt Pavement”, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 5216827, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5216827>
17. Ильина О.Н., Ильин И.Б., Хусаенов Б.К., Силкин В.В. Теплый асфальтобетон на основе цеолита // Транспортное строительство. 2022. № 2. 2022. С. 21–23.
18. Радовский Б.С. Технология нового теплого асфальтобетона в США // Дорожная техника. 2008. № 8. С. 24–28.
19. Алшахван Аладдин, Калгин Ю.И. Обзор технологий приготовления тёплых асфальтобетонных смесей // Молодой ученый. 2019. № 32 (270). С. 102–107. URL: <https://moluch.ru/archive/270/61981>

REFERENCES

1. Morozova N.N., Kajs H. A. Svoystva prirodno-go ceolita dlja poluchenija vysokoprochnogo melkozernistogo betona [Properties of natural zeolite for producing high-strength fine-grained concrete]. *Stroitel'nye materialy*. 2017; 6: 63–68. (In Russ.)
2. Nikolaeva L.A., Kopylov V.E., Burenina O.N., Popov S.N., Portjagina V.V. Ispol'zovanie modifitsirovannyh asfal'tobetonov dlja razvitiya transportnoj infrastruktury gornodobyvajushihh predpriyatij Jakutii [The use of modified asphalt concrete for the development of transport infrastructure of mining enterprises in Yakutia]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2014; 9: 398–404. (In Russ.)
3. Mechanical Evaluation of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration Used in Road-base / Q. Tang, F. Gu, H. Chen [et al.]. *Advances in Civil Engineering*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/5694908>
4. Marinkovic M., Milovic T., Matic B. Zeolite as additive in warm mix asphalt. V International conference Contemporary achievements in civil engineering 21. Subotica, Serbia. 2017. P. 483-490.
5. Beregovaja N.G., Gerasimenko V.V., Molchanov S.A., Morozov M.M. Perspektivy vtorichnogo ispol'zovanija otrabotannogo ceolita tipa NAX Orenburgskogo gazohimicheskogo kompleksa [Prospects for the recycling of spent NAX type zeolite from the Orenburg gas chemical complex]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015; 10: 334-336. (In Russ.)
6. Pustovgar A.P. Jeftektivnost' primenenija aktivirovannyh diatomitov v suhih stroitel'nyh smesjah [Efficiency of using activated diatomites in dry building mixtures]. *Stroitel'nye materialy*. 2006;10: 62-64. (In Russ.)
7. Satybaldiev A.K., Ivchin D.S. Vlijanie mineral'nyh dobavok na svoystva portlandcementsa [The influence of mineral additives on the properties of Portland cement]. *Molodoj uchenyj*. 2020; 4 (294):11-14. (In Russ.)
8. Morozova N.N., Gulyakov E.G. Properties of concrete based on zeolitecontaining binder. *News KSUAE*. 2023; 2 (64): 27-39. (In Russ.) DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27, EDN: LCQWVC
9. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A. Jeftektivnost' kompleksnoj mineral'noj dobavki v melkozernistom samouplotnjajushhemsja betone [Efficiency of a complex mineral additive in fine-grained self-compacting concrete]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2021;3 (48): 114-122. (In Russ.)
10. Koval' I.V., Kalinovskaja N.N., Al'-Musavi K.S. Ispol'zovanie mineral'nyh dobavok v tehnologii monolitnogo betona i proizvodstve sbornogo zhelezobetona [The use of mineral additives in the technology of monolithic concrete and the production of prefabricated reinforced concrete]. *Tehnologii betonov*. 2020; 11-12 (172-173): 25-31. (In Russ.)
11. Il'ina O.N., Silkin V.V. Ob ustrojstve dorozhnyh osnovanij s primeneniem ceolita [About the construction of road bases using zeolite]. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022; 4: 10-14. (In Russ.)
12. Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C., Pérez-Mena V., Cabanillas P., «Re-use of Zeolite By-Products Derived from Petroleum Refining for Sustainable Roads», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 4256989, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4256989>
13. Jan Mikolaj, Frantisek Schlosser, Lubos Remek, Martin Pitoňák, Juraj Šrámek, «Properties of Asphalt Mixtures Using Reclaimed Asphalt Containing Polymer-Modified Binder and Technicoeconomical Considerations of Their Use», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 2030763, 12 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2030763>
14. Zhuolin Li, Junda Ren, Jianping Zhu, Wei Li, Xingsheng Fu, Liying Yang, «Study on the Construction Performance of Zeolite Asphalt Mixture Based on Macro-Micro Scale», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID 4137321, 21 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4137321>
15. Zhanping You, Meor O. Hamzah, Hainian Wang, Aboelkasim Diab, Qingli Dai, «Advanced Pavement Materials for Sustainable Transportation Infrastructure», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, Article ID 3175651, 1 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3175651>
16. Haibin Deng, Deyi Deng, Yinfei Du, Xinmin Lu, «Using Lightweight Materials to Enhance Thermal Resistance of Asphalt Mixture for Cooling Asphalt Pavement», *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 5216827, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5216827>
17. Il'ina O.N., Il'in I.B., Husaenov B.K., Silkin V.V. Teplyj asfal'tobeton na osnove ceolita [Warm asphalt concrete based on zeolite]. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022; 2, 2022: 21-23. (In Russ.)
18. Radovskij B.S. Tehnologija novogo teplogo asfal'tobetona v SShA [Technology of new warm asphalt concrete in the USA. Road equipment]. *Dorozhnaja tehnika*. 2008; 8: 24-28. (In Russ.)
19. Alshahvan, Aladdin, Kalgin Ju. I. Obzor tehnologij prigotovlenija tjoptyh asfal'tobetonnyh smesej [Review of technologies for preparing warm asphalt concrete mixtures] *Molodoj uchenyj*. 2019; 32 (270): 102-107. URL: <https://moluch.ru/archive/270/61981>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ильина Ольга Николаевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильные дороги, мосты и тоннели», SPIN-код: 5666-0966.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olga N. Ilina – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Roads, Bridges and Tunnels Department, SPIN code: 5666-0966.