

На правах рукописи



**СТЕПАНЕНКО МАРГАРИТА АНДРЕЕВНА**

**АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОН  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗОЛ-УНОСА**

**Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Белгород – 2025**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Маркова Ирина Юрьевна**

Официальные оппоненты: **Чулкова Ирина Львовна**,  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
автомобильно-дорожный университет  
(СибАДИ)», профессор кафедры  
«Промышленное и гражданское строительство»

**Балабанов Вадим Борисович**,  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
заведующий кафедрой «Автомобильные  
дороги»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Защита состоится «19» декабря 2025 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Stepanenko](https://gos_att.bstu.ru/dis/Stepanenko)

Автореферат разослан «23» октября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Решение ключевых задач дорожно-строительной отрасли, осуществляемое в рамках Транспортной стратегии РФ до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 года, Стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 гг., а также национальных проектов «Безопасные качественные дороги» и «Региональная и местная дорожная сеть», сопряжено с потреблением колоссальных объемов минерально-сырьевых ресурсов. Высокая стоимость и дефицитность природного сырья определяет актуальность исследований в области применения крупнотоннажного вторичного и техногенного сырья для получения широкого спектра органоминеральных композиционных материалов дорожно-строительного назначения, применяемых при устройстве различных функциональных слоев дорожных одежд.

Одними из крупнотоннажных видов техногенного сырья (более 23 млн тонн в год) являются отходы топливно-энергетической промышленности, среди которых особый интерес представляют золы-уносы. С точки зрения утилизации вторичного сырья, имеющего высокое сродство с компонентами сырьевых смесей дорожно-строительных материалов, актуально использование изношенных конструктивных элементов автомобильных дорог в виде асфальтогранулята. В связи с этим, актуальной задачей является разработка асфальтогранулобетонов (АГБ) – органоминеральных дорожно-строительных композиционных материалов на основе асфальтобетонного гранулята – в качестве крупного заполнителя, с применением зол-уноса – в качестве полифункциональных минеральных компонентов, а также различных видов вяжущих. Разработанные рецептурно-технологические решения позволят при замене дефицитных природных материалов (щебень, песок) обеспечить сохранение характеристик конечных композитов при эксплуатации АГБ в различных слоях дорожных одежд.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта президента РФ НШ-2584.2020.8 и гранта РНФ № 23-19-00796.

**Степень разработанности темы.** Анализ отечественных и зарубежных исследований в области повторного использования изношенных асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог свидетельствует о накопленном опыте разработки и применения технологических приемов и оборудования. Переработка вторичного сырья в виде асфальтобетонного гранулята и получение новых композиционных материалов на его основе нередко приводит к необходимости использования традиционных сырьевых компонентов для обеспечения надлежащего качества конечных композитов. Применение крупнотоннажного техногенного сырья, такого как золы-уноса, обладающих высоким потенциалом в регулировании свойств вяжущих различной природы и типов твердения, для полной или частичной замены традиционных компонентов может обеспечить комплекс заданных показателей для использования композитов в качестве различных функциональных слоев дорожных одежд. Учитывая особенности изменения свойств асфальтобетонов, связанных с процессами старения органических вяжущих, а также вариативность свойств техногенного сырья,

напрямую связанную с совокупностью факторов его образования, их совместное использование требует систематизации исследований относительно состава и свойств базового сырья, а также их взаимного влияния на изменение свойств применяемых вяжущих и конечных композитов для обеспечения нормативных показателей эксплуатационной надежности и долговечности АГБ.

**Цель работы.** Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение асфальтогранулобетонов с применением зол-уноса, для устройства конструктивных слоев дорожных одежд.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

- оценка состава, свойств и обоснование целесообразности и эффективности применения вторичного – асфальтобетонный гранулят, и техногенного сырья – золы-уноса ТЭС, в составе АГБ в качестве функциональных компонентов для замены традиционных материалов;
- изучение процессов структурообразования в системе «цемент – зола-уноса» в зависимости от типа золы-уноса (ЗУ);
- подбор рациональных рецептурно-технологических параметров получения асфальтогранулобетонных смесей (АГБС) и изучение комплекса физико-механических свойств АГБ с применением ЗУ;
- расчет конструкций дорожных одежд и анализ экономической эффективности применения разработанных АГБ;
- разработка нормативно-технической документации для реализации результатов исследований. Апробация работы.

**Научная новизна работы.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение асфальтогранулобетона с применением зол-уноса различного состава. Рациональное соотношение вяжущего и зол-уноса с учетом их типа, выполняющих роль регуляторов структурообразования в составе вяжущих систем («цемент – зола-уноса» / «цемент – зола-уноса – битумная эмульсия») при частичной замене цемента обеспечивает получение полужестких ресурсосберегающих органоминеральных композиционных материалов с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В зависимости от химического состава, дисперсности и морфологии частиц, ЗУ выступают в качестве активного компонента, участвующего в процессах гидратации и набора прочности цемента, а также в распределении пленок битума в матрице композита в результате распада эмульсии и регулировании свойств последнего (прочность под воздействием температур, водостойкость) в процессе эксплуатации.

Предложена феноменологическая модель структурообразования АГБ с применением зол-уноса. При получении полужестких материалов золы-уноса обеспечивают формирование плотной упаковки частиц минерального остова; в процессе гидратации цемента выступают центрами кристаллизации (основные) и пуццоланами (кислые), способствующими формированию плотной матрицы гидратных соединений; непрореагировавшие частицы золы являются центрами адсорбции органического вяжущего, в результате чего проявляется структурирующий эффект, выраженный в дисперсном упрочнении и длительной стабилизации свойств органического вяжущего за счет донорно-акцепторного механизма взаимодействия.

Установлены закономерности влияния рецептурных факторов на формирование свойств АГБ при комплексном использовании вторичного и техногенного сырья с учетом процессов структурообразования в зависимости от применяемого вида вяжущего (цемент/цемент + битумная эмульсия), позволяющие установить границы варьирования для получения дорожных композитов с заданными свойствами.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования АГБ при комплексном использовании вторичного и техногенного сырья в виде асфальтобетонного гранулята и зол-уноса различного состава в сочетании с различными вяжущими системами. Установлены закономерности влияния состава компонентов асфальтогранулобетонных смесей на физико-механические свойства АГБ.

Разработаны составы асфальтогранулобетонных смесей на основе минерального и комплексного вяжущего, позволяющие получать асфальтогранулобетон со следующими характеристиками:  $R_{20}$  (7 сут.) – 0,48–0,61 МПа;  $R_{40}$  (7 сут.) – 0,41–0,58 МПа; водостойкость – 0,73–0,85;  $R_{20}$  (28 сут.) – 1,23–1,47 МПа.

Предложены рецептурно-технологические параметры получения АГБС, заключающиеся в проведении холодной регенерации асфальтобетона с необходимостью предварительного смешения сухих компонентов (цемент, зола-уноса).

Выполнен расчет конструкций дорожных одежд с использованием АГБ для устройства различных конструктивных слоев (основание, покрытие) автомобильной дороги III и IV технической категории.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы является комплексный подход при исследовании состава и свойств сырья с целью определения рационального соотношения функциональных компонентов в триаде: крупный заполнитель – вяжущая система – добавка в составе АГБ. Идея базируется на известной роли структурирующих минеральных компонентов в улучшении свойств вяжущих, применяемых в составе композиционных материалов дорожно-строительного назначения. Оценка комплекса физико-механических, физико-химических свойств сырьевых и синтезированных материалов проводилась с использованием нормируемых и научно признанных методик. Подбор составов производился с учетом рекомендаций ОДМ 218.6.1.005–2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации», а ключевые физико-механические свойства разработанных АГБ оценивались на основании ГОСТ 70197.1–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Общие технические условия».

**Положения, выносимые на защиту:**

- теоретически обоснованное и экспериментально подтвержденное технологическое решение, обеспечивающее получение АГБ с применением зол-уноса с улучшенными физико-механическими свойствами;
- характер влияния зол-уноса как минеральной добавки на структурообразование и свойства цементного вяжущего в зависимости от типа ЗУ;
- взаимосвязь между составом, свойствами и соотношением исходных компонентов и совокупностью физико-механических свойств конечного композита;

- рациональные составы АГБС и рецептурно-технологические факторы их получения для достижения необходимых параметров;
- расчет конструкций дорожных одежд и оценка экономической эффективности предложенных решений. Результаты апробации.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечена комплексом экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методик и поверенного оборудования на основании требований нормативно-технической документации; апробацией результатов в промышленных условиях; получением результатов, непротиворечащих классическим положениям строительного материаловедения в целом и дорожно-строительного материаловедения в частности, а также работам других авторов.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах, среди которых: VI Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения» (Липецк, 2025); VII Международная научно-практическая конференция «Качество. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2024); XXI Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2024); XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2023); Международная научно-технологическая конференция молодых ученых (Белгород, 2020); Российская конференция с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкнинские чтения)» (Сыктывкар, 2020); VIII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2016).

**Внедрение результатов исследований.** Промышленная апробация производства и применения разработанных составов АГБ проводилась на базе ООО «Герба» (г. Шебекино). С целью внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативно-технические документы:

- СТО 02066339-083-2025 «Асфальтогранулобетонные смеси с применением техногенного сырья в виде зол-уноса»;
- технологический регламент на получение асфальтогранулобетонных смесей с использованием зол-уноса.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 «Строительство» и 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»; магистров – 08.04.01 «Строительство»; специалистов – 08.05.02 «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей».

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 20 публикациях, в том числе: 5 статей в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК РФ; 3 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus; 2 патента на изобретение.

**Личный вклад.** Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение АГБ с применением техногенного сырья в виде зол-уноса в сочетании с

различными вяжущими системами. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, последующая статистическая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 178 страницах машинописного текста, включающего 45 таблиц, 44 рисунка, список литературы из 158 источников, 6 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Высокий спрос на сырье для получения дорожно-строительных материалов обусловлен реализацией ряда стратегических программ, национальных проектов, введением ограничений на добычу общераспространенных полезных ископаемых, возникшей в последние годы, необходимостью восстановления инфраструктурных объектов в приграничных зонах, включающих разветвленную сеть автомобильных дорог общего пользования. В этой связи, применение вторичного и техногенного сырья (отходов различных производств) в качестве полной или частичной замены традиционного природного сырья при обеспечении надлежащего качества дорожно-строительных материалов в настоящее время весьма актуально.

Для формирования заданных физико-механических свойств АГБ на основании анализа состава и свойств асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог в сочетании с различными видами вяжущих предложено использование зол-уноса как полифункциональных компонентов, обеспечивающих получение полужестких дорожно-строительных композиционных материалов. Рациональное соотношение компонентов в составе АГБС с учетом вариативности свойств в зависимости от типа и группы активности зол-уноса при их взаимодействии с вяжущими в составе композита позволит осуществить направленное регулирование физико-механических свойств АГБ, определяющих его функциональное назначение в конструкциях дорожных одежд. Это и явилось *рабочей гипотезой* данного исследования.

В качестве сырьевых компонентов для получения рациональных составов АГБ использовались: цемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент»; битумная эмульсия марки ЭБДК-М производства ООО «Автодорстрой-подрядчик».

В качестве *вторичного сырья* в работе изучены свойства 4-х проб асфальтобетона (а/б) марки П, типа Б, отобранных на дорогах (а/д) III и IV категорий с разным сроком эксплуатации в виде асфальтобетонного гранулята (АГ) (табл. 1).

*В качестве техногенного сырья* в работе проанализированы свойства зол-уноса различных производителей. Важно отметить, что 3 образца ЗУ изучены ранее при участии соискателя: 2 кислые (или низкокальциевые) – 1) ЗУ Троицкой ГРЭС (1) (Челябинская обл.), получена при сжигании каменного угля Экибастузского месторождения, 2) ЗУ Рефтинской ГРЭС (Свердловская обл.), полу-

**Таблица 1.** Пробы асфальтобетонного гранулята

№ пробы	Категория	Срок службы
АГ	а/д	а/б
1	III	3 года
2	III	12 лет
3	IV	5 лет
4	IV	10 лет

чена при сжигании каменного угля Экибастузского месторождения; 1 основная (или высококальциевая) – ЗУ Назаровской ТЭС (Красноярская обл.), получена при сжигании бурого угля Ирша-Бородинского месторождения.

Для расширения номенклатуры сырьевой базы в части зол-уноса при получении дорожно-строительных материалов в работе изучены 2 новых образца зол: 1) кислая ЗУ Кемеровской ГРЭС (Кемеровская обл.), получена при сжигании каменного угля марки «Д» Кузнецкого месторождения; 2) основная ЗУ Троицкой ГРЭС (2) (Челябинская обл.), полученная при сжигании каменного угля марки «Г» Кузнецкого месторождения.

**Свойства асфальтобетонного гранулята.** Для обоснования возможности использования асфальтобетонного гранулята взамен крупного заполнителя, а также с целью установления технологии регенерации и состава конечного материала определены составы АГ, свойства минеральной части (табл. 2) и групповой состав битума (табл. 3).

**Таблица 2.** Свойства минеральной части АГ

Наименование показателя	Нормируемые значения	№ пробы АГ				
		1	2	3	4	
ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ						
Модуль крупности	Св. 2,0 до 2,5	2,2	2,3	2,1	2,0	
Остаток на сите № 063, % масс.	Св. 30 до 45	44	32	41	39	
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	–	2,02	2,17	1,99	2,16	
Содержание естественных радионуклидов, Бк/кг	св. 370 до 740 св. 740 до 1500	70	64	73	67	
ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ						
Полные остатки на ситах, % масс.	d	от 90 до 100	97	98	95	93
	0,5(d+D)	от 30 до 60	60	59	57	54
	D	до 10	3,2	3,9	4,2	3,7
	1,25D	до 0,5	0	0,1	0	0,2
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % масс.	св. 15 до 25	11,9	14,1	12,5	13,5	
Марка по дробимости	600–1400	1200	800	1200	1000	
Марка по истираемости	И1–И4	И1	И3	И1	И2	
Морозостойкость	F15–F400	F300	F150	F300	F200	
Содержание естественных радионуклидов, Бк/кг	св. 370 до 740 св. 740 до 1500	82	76	64	79	

**Таблица 3.** Групповой состав битума после экстрагирования

Компоненты, %	№ пробы АГ			
	1	2	3	4
Карбоиды и карбены	–	0,6	0,1	0,3
Асфальтены	25,6	41,1	29,2	36,3
Углеводороды:				
– насыщенные	28,7	16,1	29,6	22,1
– ароматические	21,6	9,8	14,3	11,4
Смолы	20,3	32,4	26,8	29,9

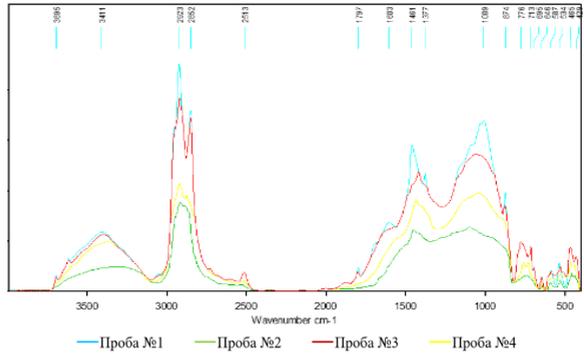
Свойства всех минеральных компонентов АГ различных сроков эксплуатации соответствуют нормативным требованиям (табл. 2). Количество вяжущего в составе данных проб варьируется от 6,5 до 8 %, что входит в нормируемые пределы для рассматриваемых асфальтобетонов.

Анализ старения битума (табл. 3) показал, что наименьшее сум-

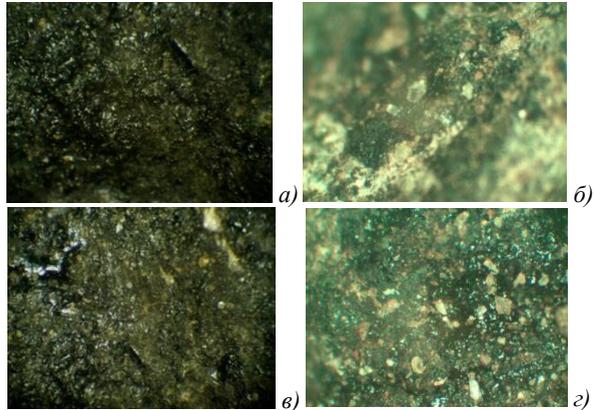
марное количество легколетучих фракций (9,8 и 11,4 %), способствующих релаксации битума после приложения нагрузок в широком температурном диапазоне, отмечается у проб № 2 и 4. У указанных проб, отмечается наибольшее содержание карбоидов и карбенов, являющихся продуктами разложения асфальтенов и способствующих хрупкости битума.

Это подтверждается ИК-спектроскопическим анализом органической части проб асфальтобетонного гранулята и характеризуется снижением интенсивности колебаний в диапазоне волновых чисел  $1300\text{--}1700\text{ см}^{-1}$  и  $700\text{--}1000\text{ см}^{-1}$  (рис. 1).

Визуальная оценка структуры асфальтового гранулята позволила установить, что зерна минеральной части проб № 1 и 3 равномерно и практически полностью покрыты битумом (рис. 2, а, в). Это свидетельствует о достаточном содержании вяжущего и его работоспособности в условиях эксплуатации. В составе проб № 2 и 4 отмечаются минеральные частицы и поверхность крупных минеральных зерен, не покрытых вяжущим (рис. 2, б, г). В данном случае вяжущее в результате процесса старения приобрело «зернистую» структуру и, несмотря на достаточное содержание в процессе эксплуатации не способно выполнять полноценно структурообразующую роль из-за локализации контактов с минеральными компонентами.



**Рис. 1.** ИК-спектры вяжущего из АГ после экстрагирования



**Рис. 2.** Структурные особенности проб асфальтового гранулята: а – проба № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4

Исходя из состава и свойств минеральной части допускается применение всех проб АГ для получения асфальтогранулобетонных смесей АГБС-16. Исходя из группового состава битума, определяющего его реотехнологические свойства, целесообразно рассматривать получение АГБС по наиболее распространенной холодной технологии с применением минерального или комплексного вяжущего позволяющего получать наиболее прочный конечный композит.

Для обоснования возможности и эффективности использования зол-уноса в составе АГБС в сочетании с различными видами вяжущих проанализирован комплекс свойств (табл. 4).

**Таблица 4.** Нормируемые свойства зол-уноса как компонентов различных видов вяжущих систем

Наименование показателя	Нормируемые значения	Тип зол-уноса				
		кислые			основные	
		Троицкая (1)	Рефтинская	Кемеровская	Назаровская	Троицкая (2)
<b>Свойства зол-уноса в соответствии с ГОСТ Р 52129-2003</b>						
Зерновой состав, (мм) % по массе:						
– <1,25	≥ 95	100	100	100	100	100
– <0,315	80–95	99,4	99,4	99,9	99,9	99,4
– <0,071	≥ 60	79	76,3	94,5	94,5	79
Пористость, %	≤ 40	43	36	34	42	43
Показатель битумоемкости, г/100 см <sup>3</sup>	≤ 80	84	51	59	59	84
Влажность, %	≤ 2,5	0,27	0,15	0,40	0,40	0,27
<b>Свойства зол-уноса в соответствии с ГОСТ 25818-2017</b>						
<i>по физико-механическим свойствам</i>						
Удельная поверхность по ПСХ, м <sup>2</sup> /кг	> 300	492	327	217	449	580
Остаток на сите № 008, мас. %	< 15	15	17	19,5	0,5	15
Водопоглощение, %	< 95	73	67	79	67	68
Индекс активности на 28 сут.	≥ 75	84	73	72	76	76
Индекс активности на 90 сут.	≥ 85	95	78	94	87	84
<i>по химическому составу (нормируемые значения для кислых/основных)</i>						
Содержание СаО, мас. %	≤10/≥10	0,61	1,28	5,09	37,80	16,74
Содержание MgO, мас. %	≤5	1,06	0,58	2,25	6,31	3,28
Содержание сернистых и сернокислых соед. в пересчете на SO <sub>3</sub> , мас. %	≤3	0,21	0,15	0,18	4,40	1,11
Содержание щелочных оксидов в пересчете на Na <sub>2</sub> O, мас. %	≤3/≤1,5	1,05	0,53	1,29	0,76	0,58
Содержание хлорид-ионов, мас. %	≤0,1	–	–	–	–	–
Потеря массы при прокаливании	≤5/≤2	4,59	1,90	2,05	3,15	16,74
<b>Свойства зол-уноса в соответствии с ГОСТ 30108-94</b>						
Сод-е естественных радионуклидов, Бк/кг	<740	92±26	103±94	85±7	365±24	381±23

По отношению к битумным вяжущим показатели пористости и битумоемкости из 5 образцов зол-уноса несколько завышены (на 12,5 и 7,5 % соответственно) у кислой ЗУ Троицкой ГРЭС (1) и основной ЗУ Троицкой ГРЭС (2). Так как золы предполагается использовать в ограниченных количествах в качестве функциональных добавок для ориентированного распределения битумных пленок в объеме композиционного материала в результате распада эмульсии, то кислая ЗУ с учетом ее химического состава будет оказывать положительное влияние, а основная приведет к ускорению процесса распада и неравномерному распределению битума. Это обусловлено взаимодействием ЗУ с вяжущим по донорно-акцепторному механизму исходя из кислотно-основных свойств, где дополнительный эффект проявляется за счет строения частиц золы и их пористости.

Учитывая, что при получении АГБС как с применением минерального, так и комплексного вяжущего наибольший вклад в процессы структурообразования оказывает цемент и его взаимодействие с другими реакционноспособными компонентами, особое внимание в работе уделено изучению характера его взаимодействия с золами-уноса различных типов.

По физико-механическим свойствам как компонент цементной системы ЗУ Рефтинской ГРЭС не соответствует ГОСТ 25818-2017 по 3-м из 5-и показателей, основными из которых является индекс активности на 28 и 90 сут. (< на 3 и 8 % соответственно), что не дает возможности использовать ее как функциональную добавку при частичной замене вяжущего. ЗУ Кемеровской ГРЭС не соответствует требованиям по удельной поверхности (< на 28 %), остатку на сите № 008 (> на 30 %) и индексу активности на 28 сут. (< на 4 %). Значение индекса активности на 90 сут. ЗУ Троицкой золы (2) также не соответствует требуемому значению (снижено на 1 единицу). Это так же ставит под сомнение целесообразность ее использования.

Несмотря на то, что взаимодействие ЗУ с цементом исходя из их состава протекает по общеизвестным механизмам, которые наряду с реакциями гидратации сопровождаются пуццолановыми реакциями, зачастую спрогнозировать характер и эффективность их взаимодействия бывает сложно с использованием лишь одной методики. В связи с этим в работе применялся комплекс физико-химических (метод определения тепловыделения при твердении вяжущего (табл. 5); метод Фраттини; метод Чапеля; метод определения степени насыщения известью жидкой фазы, находящейся в контакте с цементом) и физико-механических (конец схватывания и водостойкость смеси минеральной добавки с известью; определение t-критерия) методов определения активности ЗУ по отношению к цементу (табл. 6).

По кинетике тепловыделения при гидратации цементного теста с ЗУ при 27 °С в течение 3 сут. отмечается существенное влияние минеральных добавок на процессы в начальные сроки структурообразования (табл. 5). В рамках каждого типа зол прослеживается зависимость:

чем выше содержание СаО, тем выше количество выделившегося тепла. По повышению интенсивности протекания реакций, сопровождающихся тепловыделением, ЗУ проранжированы следующим образом: Троицкая (1) → Рефтинская → Троицкая (2) → Кемеровская → Назаровская.

По данным теста Фраттини по EN 196–5:2011 (табл. 6) наибольшая пуццолановая активность (ПА) на 8 и 15 сутки отмечается у всех кислых ЗУ, а также у основной ЗУ Троицкой ГРЭС (2). Это обусловлено высоким содержанием рентгеноаморфной фазы, состоящей преимущественно из кремнезема (SiO<sub>2</sub> –

**Таблица 5.** Тепловыделение смесей при гидратации

Количество и наименование добавки в составе вяжущего	dQ/dt, Дж/г	Q(t)*, Дж/г
Без добавки	5 мин 32 с – 72,02	300,55
15 % ЗУ Троицкая ГРЭС (1)	7 мин 10 с – 37,43	201,54
15 % ЗУ Рефтинская ГРЭС	7 мин 31 с – 35,28	209,96
15 % ЗУ Кемеровская ГРЭС	7 мин 16 с – 30,92	218,56
25 % ЗУ Назаровская ГРЭС	7 мин 22 с – 42,07	240,68
25 % ЗУ Троицкая ГРЭС (2)	8 мин 23 с – 35,28	211,27

\* Повышение значения Q(t):  – для кислых ЗУ;  
 – для основных ЗУ

62,53; 60,20; 59,60 и 40,31 % соответственно). Для ЗУ Назаровской ТЭС ( $\text{SiO}_2$  31,55 %) значения ПА находятся выше кривой растворимости, что свидетельствует о практическом отсутствии пуццолановой активности. По повышению пуццолановой активности ЗУ ранжированы следующим образом: Назаровская → Троицкая (2) → Троицкая (1) → Кемеровская → Рефтинская.

**Таблица 6.** Свойства зол-уноса как компонентов цементных систем

Наименование метода	Наименование показателя	Тип зол-уноса							
		ЗУ Троицкой ГРЭС (1)	кислые		основные				
			ЗУ Рефтинской ГРЭС	ЗУ Кемеровской ГРЭС	ЗУ Назаровской ГРЭС	ЗУ Троицкой ГРЭС (2)			
<b>Физико-химические методы</b>									
Метод Фраттини	Концентрации поглощенных $\text{CaO}^{2+}$ и $\text{OH}^-$	8 сут.	$\text{CaO}^{2+}$	2,7	4,9	12,96	6,25	9,99	
			$\text{OH}^-$	3,64	6,56	23,35	103,65	14,46	
		15 сут.	$\text{CaO}^{2+}$	9,2	16,56	13,96	19,98	13,98	
			$\text{OH}^-$	2,8	4,97	31,14	72,45	21,13	
		Концентрация поглощенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ускоренный)	1 сут.	$\text{CaO}^{2+}$	6,24	7,49	4,99	6,25	24,97
				$\text{OH}^-$	11,87	24,93	6,67	18,37	1,67
	3 сут.		$\text{CaO}^{2+}$	1,05	1,25	9,99	2,49	9,99	
			$\text{OH}^-$	5,83	13,12	5,56	16,40	2,22	
	7 сут.		$\text{CaO}^{2+}$	5,14	6,25	14,98	2,49	4,99	
			$\text{OH}^-$	2,33	5,91	3,34	14,43	5,56	
	28 сут.	$\text{CaO}^{2+}$	3,98	6,24	4,99	9,84	9,6		
		$\text{OH}^-$	1,73	4,59	1,11	4,99	3,34		
Метод Чапеля	Количество поглощённого $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при изотермическом нагреве, мг	7,66	660	237,6	77,65	211,2			
Метод Запорожца	Количество поглощенного $\text{CaO}$ (метод Запорожца), мг/г ( $t_{\text{max}}=28$ ч)	30,14 (24 ч)	28,77 (24 ч)	19,92 (28 ч)	21,03 (28 ч)	34,86 (30 ч)			
Метод ГОСТ 25818-2017	Кол-во поглощенного $\text{CaO}_{\text{ев}}$	Норма по ГОСТ	–	–	–	$\leq 2$	$\leq 2$		
		Фактич. значения	0,013	0,075	0,970	14,050	0,094		
<b>Физико-механические методы</b>									
Метод ГОСТ 25094-2015	t-критерий	Норма по ГОСТ	$> 15$						
		Фактич. значения	9,15	9,32	8,89	15,33	12,57		
Методика Бутга-Тимашева	Конец схватывания	Норма по методике	$\leq 7$ сут.						
		Фактич. значения	5	5	1	1	3		

Наиболее высокой способностью к поглощению извести из известкового раствора по данным ускоренного метода Фраттини в 1-е сутки характеризуется кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС. У ЗУ Рефтинской ГРЭС и ЗУ Троицкой ГРЭС (1) в 1 и 3 сутки преобладает концентрация гидроксильных групп и  $\text{OH}^-$ , а в 7 и 28 – ионов  $\text{Ca}^{2+}$ . ЗУ Кемеровской ГРЭС характеризуется нарастанием суммарной концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  от 1 к 7 суткам, а на 28 сутки – существенным снижением. У ЗУ Троицкой ГРЭС (2) наблюдается характерное попеременное нарастание и снижение суммарной концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ . ЗУ Назаровской ТЭС характеризуется линейным снижением суммарной концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , но во все контрольные сроки преобладает концентрация гидроксильных групп  $\text{OH}^-$  из-за высокого содержания  $\text{CaO}$  и относительно низкого содержания аморфной составляющей. По повышению активности золы можно проранжировать: Кемеровская → Назаровская → Троицкая (2) → Троицкая ГРЭС (1)

→ Рефтинская.

По методу Чапеля установлено, что наиболее высокой пуццолановой активностью характеризуется ЗУ Рефтинской ГРЭС – количество поглощённого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  составило 660 мг, что в 8,5 раз выше по сравнению ЗУ Назаровской ТЭС. Пуццолановая активность ЗУ Троицкой ГРЭС (2) и Кемеровской ГРЭС характеризуется примерно одинаковыми значениями. Это объясняется суммарным содержанием оксидов алюминия и железа в составе ЗУ, а также особенностью методики. Последовательность ЗУ по повышению пуццолановой активности по методу Чапеля имеет следующий вид: Назаровская → Троицкая (1) → Троицкая (2) → Кемеровская → Рефтинская.

По данным метода Запорожца отмечается корреляция между количеством поглощенного  $\text{CaO}$  и содержанием свободного оксида кальция в рамках каждого типа. Для кислых ЗУ, чем выше содержание  $\text{CaO}_{\text{св}}$  по с ГОСТ 25818–2017, тем ниже количество поглощенного  $\text{CaO}$  и тем больше времени требуется для достижения экстремума. Для основных зол зависимость по количеству поглощенного  $\text{CaO}$  сохраняется, но несмотря на меньшее содержание  $\text{CaO}_{\text{св}}$  время для достижения экстремальной концентрации поглощенного  $\text{CaO}$  увеличивается, что связано с высоким содержанием примесей, выраженных суммарным содержанием потерь при прокаливании и прочим.

Содержание  $\text{CaO}_{\text{св}}$  в составе основной ЗУ Назаровской ТЭС в 7 раз превышает допустимое предельное значение по ГОСТ 25818–2017. Это обусловлено высоким содержанием в ее составе общего количества  $\text{CaO}$ , а также наличием клинкерных минералов, что характеризует основную ЗУ Назаровской ТЭС как высокоактивную. Об этом свидетельствуют данные об уменьшении сроков схватывания в ранее проведенных исследованиях. При использовании ее для частичной замены цемента, следует строго контролировать концентрацию добавки в составе смесей, а также сроки схватывания и твердения. ЗУ Назаровской ТЭС оказывает существенное влияние на процессы структурообразования и может привести к саморазрушению в результате избыточного роста кристаллических структур, создающего высокое внутреннее напряжение. Кроме того, следует уделять внимание началу схватывания, которое определяет временной отрезок доставки смеси (если она не готовится на участке), ее распределения и уплотнения.

При определении  $t$ -критерия по ГОСТ 25094-2015, установлено, что полученные значения коррелируют со значениями индекса активности (см. табл. 4), а соответствует требованиям лишь ЗУ Назаровской ТЭС. Метод определения  $t$ -критерия позволяет получить достоверные результаты в гораздо более сжатые сроки, чем метод определения индекса активности на 28 и 90-е сутки, так как подготовка образцов проводится с использованием пропарочной камеры, что так же позволяет после извлечения образцов визуально оценить влияние оксида магния на изменение объема образцов и их геометрических параметров.

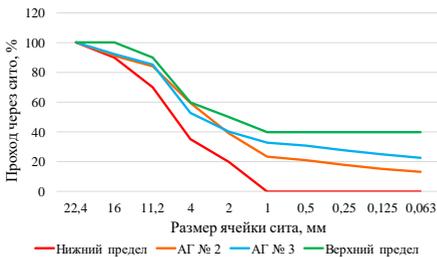
По данным конца схватывания и водостойкости (рис. 3) выявлено, что наступление конца схватывания у всех образцов вяжущего с ЗУ происходит в рекомендуемые сроки. Наиболее длительным сроком конца схватывания характеризуется ЗУ Троицкой ГРЭС (1) и ЗУ Рефтинской ГРЭС. При погруже-

нии образцов в гидравлическую ванну образцы составов смесей с использованием кислых ЗУ Рефтинской ГРЭС и Троицкой ГРЭС (1), а также основной ЗУ Троицкой ГРЭС (2) полностью разрушаются после погружения, а образцы с использованием Назаровской и Кемеровской ЗУ сохранили свой объём и форму.



**Рис. 3.** Водостойкости смеси минеральных добавок с известью: Ц – цемент; Н – ЗУ Назаровская; Р – Рефтинская; К – Кемеровская; Т1 – Троицкая (1); Т2 – Троицкая (2); а – при погружении в гидравлическую ванну; б – по истечении 3 суток

На основании комплексного анализа свойств зол-уноса, их реакционной способности и особенностей процесса структурообразования в сочетании с основным структурообразующим компонентом разрабатываемых АГБС (цементом) установлено, что наибольшей активностью и устойчивостью под воздействием внешних факторов характеризуются экспериментальные модельные системы (с учетом методик проведения экспериментов) с применением кислой ЗУ Кемеровской ГРЭС и основной ЗУ Назаровской ТЭС. В этой связи для дальнейших исследований применялись указанные образцы ЗУ.



**Рис 4.** Зерновой состав АГБС на основе используемых проб АГ

цемента, золы-уноса, битумной эмульсии/воды. Контролируемыми параметрами установлены: водостойкость, предел прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С (в возрасте 7 сут.), предел прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С (в возрасте 28 сут.). На основании комплексного анализа совокупности влияния различных вяжущих в сочетании с ЗУ на физико-механические свойства АГБ установлено, что предпочтительными с точки зрения применения в покрытии/основании автомобильных дорог и достижения необходимых параметров являются следующие составы асфальтогрануло-бетонных смесей (табл. 7).

Результаты испытаний образцов АГБС (табл. 8, рис. 5) показывают эффективность совместного применения вторичного сырья с минеральным (цемент

**Разработка составов асфальтогранулобетон** проводилась с учетом требований ГОСТ Р 70197.1–2022 к зерновому составу (рис. 4), а также с использованием метода математического планирования эксперимента на основании рекомендуемых пределов варьирования других компонентов по ОДМ 218.6.1.005. В качестве параметров варьирования выбрано процентное содержание: цемента, золы-уноса, битумной эмульсии/воды. Контролируемыми параметрами установлены: водостойкость, предел прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С (в возрасте 7 сут.), предел прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С (в возрасте 28 сут.). На основании комплексного анализа совокупности влияния различных вяжущих в сочетании с ЗУ на физико-механические свойства АГБ установлено, что предпочтительными с точки зрения применения в покрытии/основании автомобильных дорог и достижения необходимых параметров являются следующие составы асфальтогрануло-бетонных смесей (табл. 7).

+ ЗУ) или комплексным (цемент + ЗУ + битумная эмульсия) вяжущим.

**Таблица 7.** Рациональные составы АГБС

Наименование сырьевого компонента	Рекомендуемое * сод-е компонентов по ОДМ 218.6.1.005, %	Содержание компонентов в смеси, % (вяжущие, добавка и вода: сверх 100 % заполнителя / в 100 %) **		
		АГБС 16-М(К)	АГБС 16-М(О)	АГБС 16-К
АГ (проба №2)	> 65	–	–	100/94,18
АГ (проба №3)		100/95,70	100/95,70	–
Цемент ЦЕМ I 42,5 Н	2–4 св. АГ	2,25/2,15	2,55/2,44	2,5/2,35
ЗУ Кемеровской ГРЭС	3–5 св. АГ	0,75/0,70	0,45/0,43	–
ЗУ Назаровской ТЭС		–	–	0,68/0,64
Вода	≤ 100 от Ц	50(1,5)/1,45	50 (1,5)/1,43	–
Битумная эмульсия (ЭБДК-М)	2–4 св. АГ	–	–	3/2,83
<b>Итого:</b>		104,5/100	104,5/100	106,18/100

\*АГ – асфальтовый гранулят; Ц – цемент;

\*\*М – минеральное вяжущее; К – комплексное вяжущее; (К) – кислая, (О) – основная ЗУ

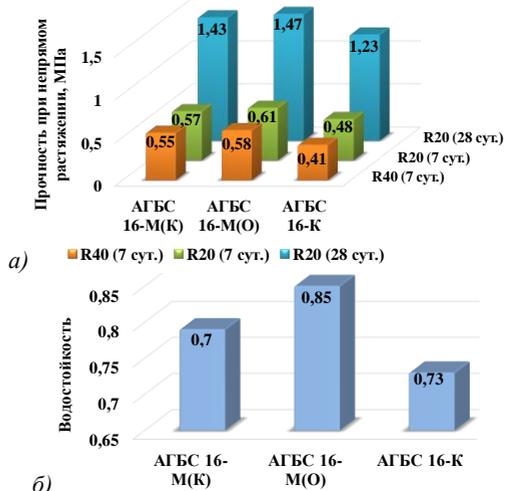
**Таблица 8.** Свойства рациональных составов асфальтогранулобетона

Наименование показателя	Нормир. значения*		Наименование состава асфальтогранулобетона			
	ОДМ 218.6.1.005 О/П	ГОСТ 70197.1	АГБС 16-М(К)	АГБС 16-М(О)	АГБС 16-К	
Водостойкость	0,5/0,7	0,7	0,79	0,85	0,73	
Предел прочности при непрямом растяжении, МПа	R <sub>20</sub> (7 сут.)	0,25/0,30	0,3	0,57	0,61	0,48
	R <sub>40</sub> (7 сут.)	0,25(М); 0,20(К)	0,25(М); 0,20(К)	0,55	0,58	0,41
	R <sub>20</sub> (28 сут.)	1,2	≤ 1	1,43	1,47	1,23

\*О – для оснований; П – для покрытий; М – минеральное вяжущее; К – комплексное вяжущее

Анализ физико-механических свойств составов асфальтогранулобетона (рис. 5) показал, что независимо от вида золы и состава АГБС значения физико-механических показателей варьируются в узком диапазоне.

Из составов на основе минерального вяжущего наибольшей водостойкостью (на 4 %) и прочностями при непрямом растяжении при различных температурах (в среднем на 5 %) отличается АГБС 16-М с использованием основной ЗУ Назаровской ТЭС, что обусловлено ее большей активностью по отношению к цементу за счет



**Рис 5.** Сравнение показателей физико-механических свойств АГБ: а – прочность; б – водостойкость

высокого содержания в ней оксида кальция и наличия клинкерных минералов, способствующих более интенсивному протеканию реакций.

Показатели свойств АГБС 16-К – с комплексным вяжущим, содержащим лишь кислую ЗУ Кемеровской ГРЭС, соответствуют нормативным требованиям, но несколько ниже чем для АГБС-16 М как с использованием кислой, так и с использованием основной ЗУ. Следует отметить, что разработанные составы в соответствии с требованиями могут быть использованы для устройства как слоев оснований, так и покрытий автомобильных дорог.

В результате разработаны составы полужестких композитов на основе асфальтобетонного гранулята с применением ЗУ, позволяющие получать асфальтогранулобетоны, обладающие комплексом заданных свойств как для устройства покрытий, так и оснований автомобильных дорог. Для внедрения разработанных составов независимости от способа холодной регенерации асфальтобетонных покрытий (на заводе / на дороге) и применяемого вяжущего (цемент / цемент+эмульсия) с учетом использования зол-уноса установлены рецептурно-технологические особенности получения асфальтогранулобетонных смесей, заключающиеся в предварительном смешении цемента с ЗУ.

Технико-экономическая эффективность разработанных АГБС для устройства оснований и покрытий (14,74 и 38,17 % соответственно) обусловлена использованием вторичного и техногенного сырья взамен традиционного, а также обеспечением  $K_{np}=1,8$  при устройстве верхнего слоя основания автомобильной дороги III технической категории, а также  $K_{np}=1,41$  при устройстве слоя покрытия автомобильной дороги IV технической категории для IV дорожно-климатической зоны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования АГБ при комплексном использовании вторичного и техногенного сырья в виде асфальтобетонного гранулята и зол-уноса различного состава в сочетании с различными вяжущими системами. Установлены закономерности влияния состава компонентов асфальтогранулобетонных смесей на физико-механические свойства АГБ.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение асфальтогранулобетона с применением зол-уноса различного состава. Рациональное соотношение вяжущего и зол-уноса с учетом их типа, выполняющих роль регуляторов структурообразования в составе вяжущих систем («цемент – зола-уноса» / «цемент – зола-уноса – битумная эмульсия») при частичной замене цемента обеспечивает получение полужестких ресурсосберегающих органоминеральных композиционных материалов с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В зависимости от химического состава, дисперсности и морфологии поверхности золы-уноса выступают в качестве активного компонента участвующего в процессах гидратации и набора прочности цемента, а также в распределении пленок битума в матрице композита в результате распада эмульсии и регулирования свойств последнего (прочность под воздействием температур, водостойкость) в процессе эксплуатации.

Предложена феноменологическая модель структурообразования АГБ с применением зол-уноса. При получении полужестких материалов золы-уноса обеспечивают формирование плотнейшей упаковки частиц минерального остова; в процессе гидратации цемента выступают центрами кристаллизации (основные) и пуццоланами (кислые), способствующими формированию плотной матрицы гидратных соединений; непрореагировавшие частицы золы являются центрами адсорбции органического вяжущего, в результате чего проявляется структурирующий эффект, выраженный в дисперсном упрочнении и длительной стабилизации свойств органического вяжущего за счет донорно-акцепторного механизма взаимодействия.

Установлены закономерности влияния рецептурных факторов на формирование свойств АГБ при комплексном использовании вторичного и техногенного сырья с учетом процессов структурообразования в зависимости от применяемого вида вяжущего (цемент/цемент + битумная эмульсия), позволяющие установить границы варьирования для получения дорожных композитов с заданными свойствами.

Разработаны составы асфальтогранулобетонных смесей на основе минерального и комплексного вяжущего, позволяющие получать асфальтогранулобетон со следующими характеристиками:  $R_{20}$  (7 сут.) – 0,48–0,61 МПа;  $R_{40}$  (7 сут.) – 0,41–0,58 МПа; водостойкость – 0,73–0,85;  $R_{20}$  (28 сут.) – 1,23–1,47 МПа.

Предложены рецептурно-технологические параметры получения АГБС, заключающиеся в проведении холодной регенерации асфальтобетона с необходимостью предварительного смешения сухих компонентов (цемент, зола-уноса).

Выполнен расчет конструкций дорожных одежд с использованием АГБ для устройства различных конструктивных слоев (основание, покрытие) автомобильной дороги III и IV технической категории.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть *рекомендованы* для внедрения на дорожно-строительных предприятиях, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Строительство» и «Материаловедение и технологии материалов», специалистов по направлению «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей».

*Перспективы дальнейших исследований* целесообразно рассматривать в направлении изучения влияния зол-уноса на эксплуатационные характеристики АГБ и коррозионную стойкость композиционных дорожно-строительных материалов с использованием различных видов вяжущих.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

### *В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК*

1. *Маркова, И.Ю.* Исследование активности отходов тепловых электростанций с позиции применения в составе минеральных вяжущих / И.Ю. Маркова, **М.А. Степаненко**, В.В. Строкова, Н.О. Лукьяненко // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 3. – С. 409-418. – DOI 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418. *К1, УБС 3, ИФ – 1,254*
2. *Степаненко, М.А.* Анализ свойств асфальтового гранулята как сырья

для получения органоминеральных композитов / М.А. Степаненко, И.Ю. Маркова, Н.О. Лукьяненко, В.В. Строкова, Л.Н. Боцман // Строительные материалы. – 2024. – № 7. – С. 65-70. *К1, УБС 3, СА(рt), ИФ – 0,832*

3. **Степаненко, М.А.** Оценка активности зол-уносов различного состава как минеральных добавок для цементных систем / М.А. Степаненко, И.Ю. Маркова, В.В. Строкова, А.Ю. Марков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 11(779). – С. 50-59. DOI 10.32683/0536-1052-2023-779-11-50-59. *К1, УБС 3, ИФ – 0,214*

4. **Марков, А.Ю.** Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол / А.Ю. Марков, А.А. Безродных, И.Ю. Маркова, В.В. Строкова, Т.В. Дмитриева, **М.А. Степаненко** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 3. – С. 26-33. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33. *К2, ИФ – 0,428*

5. **Марков, А.Ю.** Свойства топливных зол различных типов как компонентов битумной эмульсии / А.Ю. Марков, В.В. Строкова, А.А. Безродных, **М.А. Степаненко** // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2(88). – С. 67-76. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76. *К1, УБС 3, ИФ – 0,748*

#### ***В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus***

6. **Strokov, V.V.** Properties of a Composite Cement Binder Using Fuel Ashes / V.V. Strokov, I.Y. Markova, A.Y. Markov, **M.A. Stepanenko**, S.V. Nerovnaya, D.O. Bondarenko, L.N. Botsman // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 909 KEM. – P. 184-190. DOI 10.4028/p-tm4y4j. (*Q4*)

7. **Markov, A.Y.** Physico-chemical properties of fuel ashes as factor of interaction with cationic bitumen emulsion / A.Y. Markov, V.V. Strokov, I.Y. Markova, **M.A. Stepanenko** // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 95. – P. 294-300. DOI 10.1007/978-3-030-54652-6\_44. (*Q4*)

8. **Markova, I.Y.** Activity of fly ash as an indicator of their modifying ability / I.Y. Markova, A.A. Bezrodnykh, A.Y. Markov, V.V. Strokov, **M.A. Stepanenko** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. – Vol. 775. – P. 012093. – DOI 10.1088/1757-899X/775/1/012093.

#### ***В сборниках трудов конференций***

9. **Степаненко, М.А.** Применение RAP в сочетании с отходами топливно-энергетической промышленности как способ получения дорожно-строительных композитов с заданными свойствами / М. А. Степаненко // Современные проблемы материаловедения: сб. научных трудов VI Междунар. науч.-практ. конф., 27 февраля 2025 года. – Липецк: ЛГТУ, 2025. – С. 79-83.

10. **Маркова, И.Ю.** Особенности разработки составов органоминеральных дорожно-строительных композитов с применением техногенного и вторичного сырья / И.Ю. Маркова, **М.А. Степаненко**, В.В. Строкова, Д.А. Чурсанов // Качество. Технологии. инновации: Материалы VII междунар. науч.-практ. конф., 13–15 февраля 2024 года. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2024. – С. 280-284.

11. **Рулев, Д.А.** Нормативная база применения отходов промышленности в дорожном строительстве / Д.А. Рулев, **М.А. Степаненко**, А.Ю. Рязанова, А.С. Капуста // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двадцать первой Всерос. науч.-практ. конф., 29 ноября 2024 года. – Старый Оскол: НИТУ «МИСИС», 2024. – С. 588-591.

12. *Потапов, Д.Ю.* Особенности практического применения нетрадиционного сырья в дорожном строительстве / Д.Ю. Потапов, **М.А. Степаненко**, Д.А. Чурсанов // Образование. Наука. Производство: сб. докладов XVI Междунар. молодежного форума, 30–31 октября 2024 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 95–99.

13. *Маркова, И.Ю.* Технологии регенерации асфальтобетонных покрытий / И.Ю. Маркова, Д.А. Рулев, **М.А. Степаненко** // Образование. Наука. Производство: сб. докладов XV Междунар. молодежного форума, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 34–38.

14. *Рулев, Д.А.* Актуальность использования вторичного и техногенного сырья в дорожном строительстве / Д.А. Рулев, **М.А. Степаненко**, Д.А. Чурсанов // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (к 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова): сб. докладов, 16–17 мая 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Т. 4. – С. 169–174.

15. *Степаненко, М.А.* Преимущества и недостатки жестких покрытий автомобильных дорог. Перспективы применения полужестких композитов / М.А. Степаненко, А.Ю. Марков, И.Ю. Маркова, В.В. Сясин // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, 25–27 мая 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 1547–1550.

16. *Марков, А.Ю.* Аспекты применения алюмосиликатного техногенного сырья при производстве дорожно-строительных материалов / А.Ю. Марков, **М.А. Степаненко**, И.Ю. Маркова // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения - 2020): Материалы росс. конф. с междунар. участием, 07–10 декабря 2020 года. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2020. – С. 299–300.

17. *Маркова, И.Ю.* Опыт и перспективы использования зол-уноса в цементных системах / И.Ю. Маркова, А.Ю. Марков, **М.А. Степаненко** // Образование, наука, производство: VIII Междунар. молодежный форум, 15–16 октября 2016 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 516–521.

18. *Строкова, В.В.* Отходы ТЭС как перспективное алюмосиликатное сырье для модификации дорожно-строительных композитов / В.В. Строкова, И.Ю. Маркова, А.Ю. Марков, А.А. Шиман, Т.В. Дмитриева, **М.А. Степаненко** // Научеёмкие технологии и инновации: сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., 06 октября 2017 года – 07 октября 2016 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 381–386.

### **Объекты интеллектуальной собственности**

19. Пат. 2773394 Российская Федерация, МПК C04B 26/26, E01C 7/18. Состав цементасфальтобетонной смеси дорожно-строительного назначения / В.В. Строкова, И.Ю. Маркова, А.Ю. Марков, А.А. Безродных, **М.А. Степаненко**, Т.В. Дмитриева; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2021125962. Заявл. 02.09.2021. Оpubл. 03.06.2022. – Бюл. № 16. – 7 с.

20. Пат. 2775249 Российская Федерация, МПК C04B 26/26, E01C 7/18. Состав цементасфальтобетона дорожно-строительного назначения / И.Ю. Маркова, В.В. Строкова, А.Ю. Марков, А.А. Безродных, **М.А. Степаненко**, Т.В. Дмитриева; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2021125966. Заявл. 02.09.2021. Оpubл. 28.06.2022. – Бюл. № 19. – 7 с.

**СТЕПАНЕНКО МАРГАРИТА АНДРЕЕВНА**

**АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОН  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗОЛ-УНОСА**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 17.10.2025 г.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 126

Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46