

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

**На правах рукописи**



**СТЕПАНЕНКО МАРГАРИТА АНДРЕЕВНА**

**АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОН С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗОЛ-УНОСА**

**Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

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

**Белгород 2025**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....</b>	<b>11</b>
1.1 Классификация асфальтобетона, ключевые отличия, назначение.....	14
1.2 Технологические особенности способов регенерации асфальтобетонных покрытий .....	24
1.3 Функциональное назначение асфальтогранулята в составе новых композитов .....	34
1.4 Опыт применения зол-уноса в составе дорожно-строительных композитов .....	41
1.5 Выводы .....	46
<b>2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ ...</b>	<b>48</b>
2.1 Методы исследований .....	48
2.2 Характеристика применяемых материалов .....	54
2.2.1 Асфальтогранулят .....	54
2.2.2 Золы-уноса .....	55
2.2.3 Органическое вяжущее.....	62
2.2.4 Неорганическое вяжущее.....	63
2.3 Выводы .....	63
<b>3 ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОНА.....</b>	<b>65</b>
3.1 Дизайн исследования для проведения сегментированного эксперимента.....	65
3.2 Исследование свойств асфальтобетонного гранулята как компонента органоминеральных дорожно-строительных композитов.....	70
3.3 Изучение свойств зол-уноса различного состава как компонентов асфальтогранулобетона .....	76

3.4 Анализ активности зол-уноса как компонентов цементных систем .....	87
3.5 Анализ процесса структурообразования цементного камня в присутствии зол-уноса .....	102
3.6 Выводы .....	106
<b>4 СОСТАВЫ И СВОЙСТВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОНА НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРОБ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ГРАНУЛЯТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗОЛ-УНОСА .....</b>	<b>110</b>
4.1 Подбор составов асфальтогранулобетонных смесей с применением методики математического моделирования .....	110
4.2 Физико-механические свойства составов асфальтогранулобетона в зависимости от вида применяемого вяжущего и типа золы-уноса .....	123
4.3 Расчет конструкций дорожных одежд с использованием разработанных составов асфальтогранулобетона .....	128
4.4 Выводы .....	133
<b>5 ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА И ЗОЛ-УНОСА .....</b>	<b>135</b>
5.1 Технологические особенности производства и применения органоминерального композита при устройстве дорожных одежд .....	135
5.2 Экономическая эффективность применения разработанных составов асфальтогранулобетона .....	141
5.3 Апробация и внедрение результатов исследований .....	143
5.5 Выводы .....	147
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>149</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>151</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>170</b>
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Протокол измерений теплоты гидратации составов вяжущего .....	171

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Титульный лист рекомендаций по использованию асфальтогранулобетона с применением зол-уноса.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Титульный лист стандарта организации на асфальтогранулобетонные смеси с применением техногенного сырья в виде зол-уноса.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Титульный лист технологического регламента на получение асфальтогранулобетонных смесей с использованием зол-уноса.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Протокол о намерениях .....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс.....	178

## ВВЕДЕНИЕ

**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 золуноса – 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 РФФИ № 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 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 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: R20 (7 сут.)– 0,48–0,61 МПа; R40 (7 сут.) – 0,41–0,58 МПа; водостойкость – 0,73–0,85; R20 (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 работы.** 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 (Юшкинские 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».

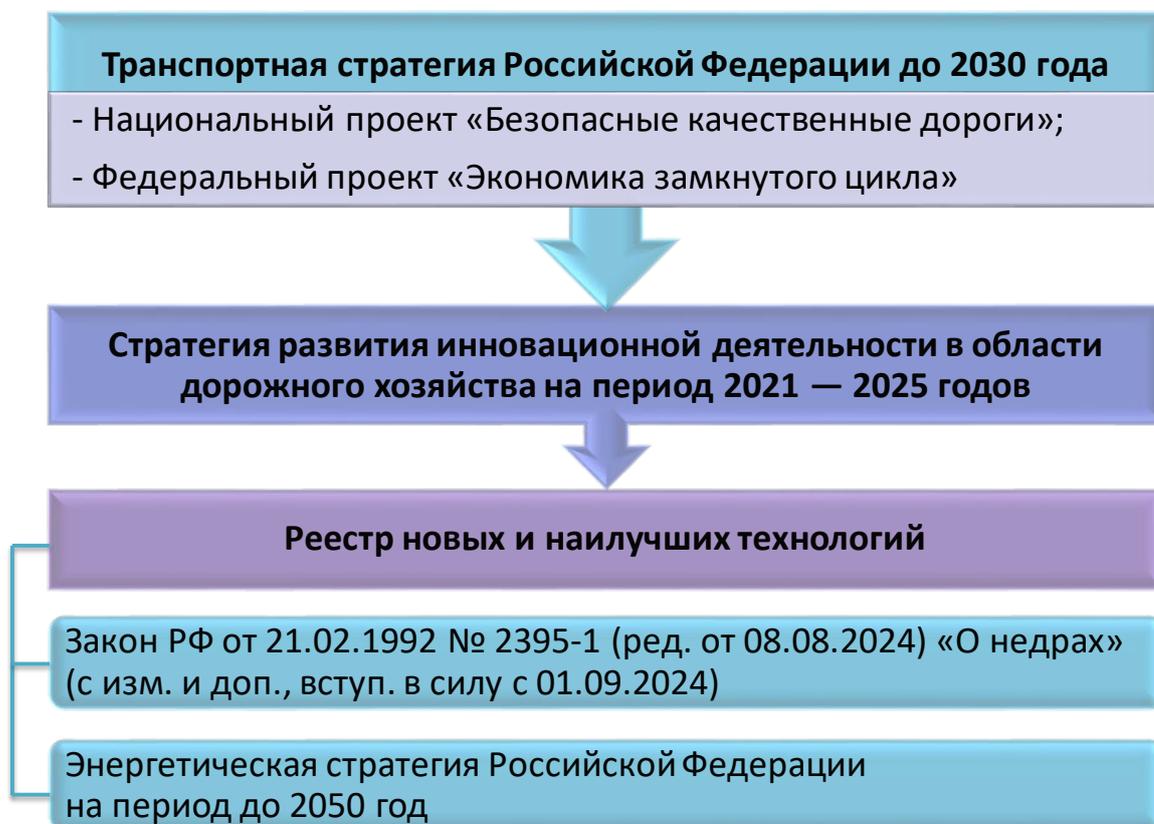
**Публикации.** Основные положения работы изложены в 20 публикациях, в том числе: 5 статей в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК РФ; 3 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus; 2 патента на изобретение.

**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.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Высокий спрос на сырье для получения дорожно-строительных материалов обусловлен ростом темпов строительных работ в виду реализации ряда стратегических программ и национальных проектов (рисунок 1.1) и, возникшей в последние годы, необходимостью восстановления инфраструктурных объектов в приграничных зонах, включающих разветвленную сеть автомобильных дорог общего пользования.



**Рисунок 1.1** – Основные стратегии, проекты и законы, обуславливающие научно-поисковые исследования в области дорожного строительства и повторного применения различного сырья

Учитывая дефицит качественных минеральных материалов для строительной отрасли, который вызван рядом причин и обусловлен, прежде всего, запретом на добычу из-за соображений экологической безопасности. На сегодняшний день российским законодательством введен запрет на добычу общераспространенных полезных ископаемых (Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 № 2395–1 (ред. от

08.08.2024)) [1].

Кроме того, в рамках реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [2] президентом РФ определен основной приоритет: «...Трансформация науки и технологий – ключевой фактор развития России и обеспечения способности страны эффективно отвечать на большие вызовы». Так как осуществление деятельности в области дорожного строительства неразрывно связано с модернизацией существующих и разработкой новых и наилучших технологий (материалов, конструкций, машин, механизмов и технических решений), а также расширением их применения с целью повышения долговечности и обеспечения сохранности автомобильных дорог и расположенных на них искусственных сооружений, повышения безопасности дорожного движения и экологической безопасности, экономии строительных ресурсов и сокращения сроков проведения дорожных работ Министерством транспорта Российской Федерации создан и успешно функционирует Реестр новых и наилучших технологий, материалов и технологических решений повторного применения [3], оператором которого является ФАУ «Росдорнии». Результаты анализа фактически примененных новых технологий и материалов из перечня новых технологий и материалов за период 2016–2024 гг показали, что подведомственные Росавтодору казенные учреждения (ФКУ) применили новые технологии и материалы более 2,6 тыс. раз на более чем 1,2 тыс. объектах дорожного хозяйства, а общая протяженность применения подобных технологий составила более 10 тыс. км.

В этой связи, применение вторичного и техногенного сырья в составе дорожно-строительных материалов в качестве полной или частичной замены традиционного сырья с целью обеспечения надлежащего качества при сниженных ресурсозатратах в настоящее время весьма актуально. Одними из наиболее крупнотоннажных отходов производства, имеющим потенциал к применению в строительстве в целом, и в дорожном строительстве в частности, являются отходы топливно-энергетической промышленности (около 22 млн тонн в год, рисунок 1.2).

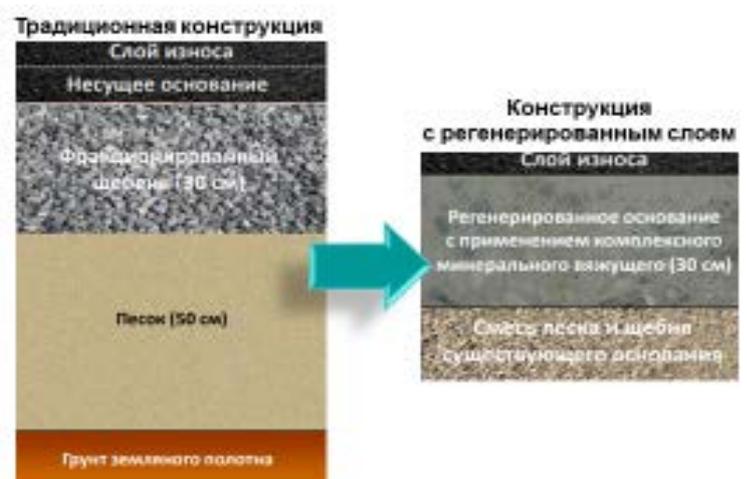
Огромный интерес для дорожного строительства представляет также повтор-

ное использование асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Это позволяет заменить дефицитные дорогостоящие каменные материалы, однако требует разработки рецептурно-технологических решений, позволяющих улучшить эксплуатационные характеристики конечных материалов (рисунок 1.3).



**Рисунок 1.2** – Ежегодные объемы образования зол-уноса и потенциал их использования по данным Минэнерго, РЭА, ОАО «ВТИ», консорциума «Феникс» [4]

Таим образом, изучение вопросов комплексного использования вторичного (перерабатываемое асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог – асфальтогранулят) и техногенного (золы-уноса) сырья в составе композитов для дорожного строительства позволит решать важнейшие межотраслевые задачи стратегического развития нашей страны.



**Рисунок 1.3** – Вариант конструкционного решения с использованием переработанного асфальтобетона

## 1.1 Классификация асфальтобетона, ключевые отличия и назначение

Асфальтобетон представляет собой уплотненную оптимально подобранную асфальтобетонную смесь, содержащую минеральные материалы (щебень, гравий, песок и минеральный порошок) с битумом, перемешанные в нагретом состоянии [5]. В силу того, что этот материал имеет ряд значительных преимуществ: высокую несущую способность; высокие упругие свойства; малый износ покрытий (до 1 мм в год); ровность и бесшовность покрытий; беспыльность и бесшумность при движении автомобилей; полная механизация всех операций; устойчивость к колееобразованию [6]; удобство ремонта и содержания; возможность вторичного использования на протяжении вековой истории применения он получил широкое распространение, занимая при этом лидирующую позицию (87 % автомобильных дорог в РФ устроено из асфальтобетона) [7].

Асфальтобетонные смеси применяются для различных целей дорожного строительства. Главное – правильно определить свойства, как исходных компонентов, так и самого асфальтобетона, для дальнейшего определения марки и возможности применения в слоях конструкции дорожной одежды с учетом проектно-исследовательских данных и условий эксплуатации. Кроме преимуществ асфальтобетон имеет и свои недостатки, важнейшим из которых является зависимость строительных работ и сроков эксплуатации покрытий от погодных-климатических факторов.

На сегодняшний день действует несколько нормативных документов на асфальтобетонные смеси и асфальтобетон, применяемые в зависимости от необходимости получения конкретного типа конечного материала и его заданного комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств:

– ГОСТ 9128–2013 Межгосударственный стандарт «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия»;

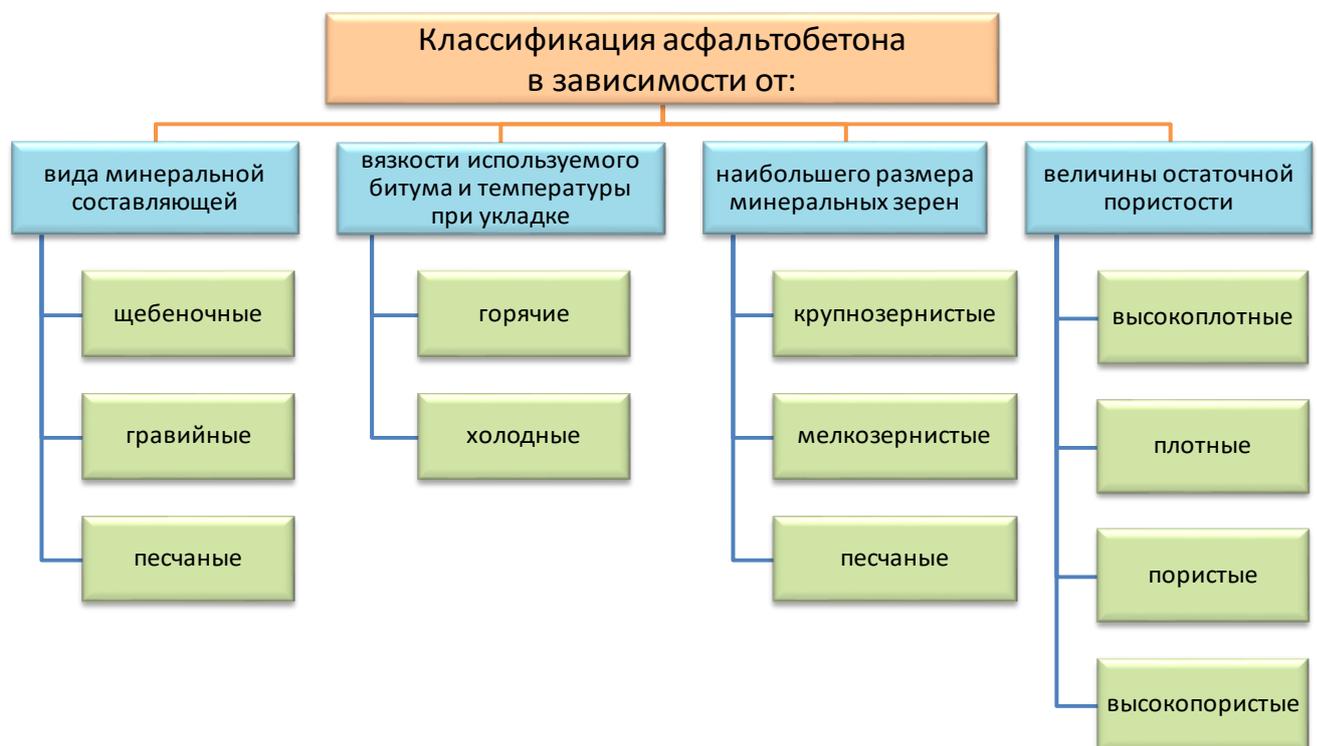
– ГОСТ Р 58406.2–2020 Национальный стандарт Российской Федерации «Дороги автомобильные общего пользования смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические

условия»;

– ГОСТ Р 70397–2022 Национальный стандарт Российской Федерации «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси теплые щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Общие технические условия»;

– ГОСТ Р 70648–2023 Национальный стандарт Российской Федерации «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси холодные асфальтобетонные и асфальтобетон. Общие технические условия».

Согласно классификации по наиболее раннему, но действующему и сегодня, ГОСТ 9128–2013, асфальтобетон в зависимости от вида минеральной составляющей делят на *щебеночные, гравийные, песчаные*; от вязкости используемого битума и температуры при укладке на *горячие и холодные*; от наибольшего размера минеральных зерен на *крупнозернистые, мелкозернистые, песчаные*; от величины остаточной пористости на *высокоплотные, плотные, пористые и высокопористые* (рисунок 1.4).



**Рисунок 1.4** – Общая классификация асфальтобетона

На сегодняшний день распространенным типом асфальтобетона является ще-

беночно-мастичный асфальтобетон, обладающий следующими важными преимуществами в сравнении с традиционными плотными асфальтобетонами: повышенными водонепроницаемостью, трещиностойкостью, сдвигоустойчивостью и теплоустойкостью [8], высокими износостойкостью и устойчивостью к старению. Щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси (ЩМАС) отличаются повышенным содержанием битума и фракционированного щебня (порядка 70–80 масс. %) [9, 10], который должен обладать улучшенной (преимущественно кубовидной) формой зерен для создания максимально устойчивого каркаса в уплотненном слое покрытия. Крупный щебень образует жесткую каркасную структуру материала, что обеспечивает эффективную передачу нагрузок на нижележащие слои дорожной одежды.

Зачастую при устройстве временных покрытий, которые не требуют высокой прочности и долговечности, применяют гравийный асфальтобетон. Особенностью гравийного асфальтобетона является его шероховатость, так как гравий имеет более грубую поверхность, чем щебень, то это приводит к более высокой шероховатости поверхности покрытия [11]. Устраивая затем вышележащие слои покрытия для повышения категории автомобильной дороги гравийный бетон обеспечивает улучшенное сцепление с дорожным покрытием.

Для устройства верхнего слоя покрытия на дорогах со средней интенсивностью движения и на участках, где требуется создание водонепроницаемого слоя [12] применяют песчаные асфальтобетонные смеси, приготовленные на дроблёном песке. Песчаные асфальтобетонные смеси на природном песке обладают меньшей сопротивляемостью усилиям, возникающим при движении транспортных средств. Песчаный асфальтобетон обладает однородной структурой, что повышает износостойкость [13, 14], и стойкостью к погодно-климатическим воздействиям. Также при применении отсева дробления как минерального компонента асфальтобетон характеризуется повышенными эксплуатационными показателями. Однако для получения песчаного асфальтобетона с требуемыми характеристиками, необходимо повышенное количество органического вяжущего, что приводит к удорожанию смеси. При этом, за счет содержания большого количества мелких частиц такие

бетоны характеризуются повышенной пластичностью [15] и низкой адгезией битума, что приводит к их недостаточной сдвигоустойчивости.

Асфальтобетон из горячих смесей наиболее широко применяют для строительства верхних и нижних слоёв покрытия практически во всех климатических зонах. Это связано с возможностью обеспечения высоких эксплуатационных свойств и долговечности дорожных покрытий. При производстве горячих асфальтобетонов применяют вязкие или жидкие нефтяные дорожные битумы, укладываемые при температуре не менее 110 °С [16–18].

Холодный асфальтобетон, как и горячий, представляет собой смесь минеральных материалов оптимально подобранного состава, органического вяжущего и быстроиспаряющегося пластификатора. В качестве органического вяжущего применяются битумы марок БНД 60/90 и БНД 90/130 (на сегодняшний день по ГОСТ Р 58829–2020 соответствуют маркам БНД 70/100 и БНД 100/130), свойства которых регулируют введением различных добавок с органическим растворителем (разжижителем) [19, 20], укладываемые с температурой не менее 5 °С. Холодные асфальтобетонные смеси готовят по той же технологии, что и горячие. Уложенный слой формируется под нагрузкой от движущегося транспорта, а окончательный срок достижения требуемых характеристик составляет 20–40 суток, в зависимости от свойств битума [21], вида минерального материала, интенсивности движения.

Отличительной особенностью холодных смесей является способность длительное время оставаться рыхлыми, что позволяет заготавливать смесь впрок с возможностью хранения до 1 года [22]. Этот материал применяют для покрытий на дорогах с малой интенсивностью движения и особенно широко для ремонта асфальтобетонных покрытий.

Преимуществами использования таких смесей являются: возможность проведения строительных работ при более низких температурах воздуха, по сравнению с горячими; срок хранения (не расфасованную смесь допускается хранить под навесом в открытых штабелях на бетонном полу в течение 1 года; расфасованная в запечатанные мешки смесь сохраняет свои свойства в течение двух лет) [23]; не требует специальных средств для ремонта.

Традиционно конструкции дорожных одежд состоят из: покрытия, основания, подстилающего слоя. Как покрытие, так и основание может состоять из одного, двух иногда слоёв функциональных слоев. При этом, крупнозернистые асфальтобетонные смеси применяют только для устройства нижнего слоя покрытия, шероховатая поверхность которого обеспечивает хорошее сцепление с верхним слоем [24, 25]. На крупнозернистый асфальтобетон в случае двухслойных покрытий в качестве финишного слоя укладывают мелкозернистую смесь, которая состоит из гравия фракции не более 20 мм [26]. Однако нередко крупнозернистый асфальтобетон выбирают и для устройства верхнего слоя основания.

Мелкозернистые асфальтобетонные смеси в зависимости от типа (ГОСТ 9128–2013) используют в различных слоях:

- многощербенистые (тип А) для устройства верхнего слоя покрытия на участках с большими продольными уклонами при тяжёлом и интенсивном движении. Покрытия из этих смесей обладают повышенной шероховатостью, что обеспечивает хорошее сцепление с автомобильными шинами;
- среднещербенистые (тип Б) для устройства верхнего слоя двухслойных покрытий при интенсивном движении;
- малощербенистые (тип В) для устройства верхнего слоя двухслойных покрытий при средней интенсивности движения с дополнительным втапливанием щебня для создания шероховатой поверхности.

Для нижнего слоя покрытия, верхнего слоя основания автомобильных дорог используют плотные асфальтобетоны типа А и типа Б, а также пористые асфальтобетоны [27, 28]. Очевидно, что асфальтобетон нижнего слоя покрытия должен препятствовать возникновению пластических деформаций (колеи) в нижележащих слоях (основании), т.е. быть максимально сдвигоустойчивым, а асфальтобетон верхнего слоя основания должен быть более устойчивым к воздействию усталостных разрушений (по причине снижения сдвигающих и возрастания растягивающих напряжений).

Сравнивая пористый и плотный асфальтобетон, следует отметить, что пори-

стый – обладает высокой сдвигоустойчивостью [29], сопоставимой со сдвигоустойчивостью плотного асфальтобетона типа А, а в некоторых случаях и выше. Таким образом, пористый асфальтобетон марки I может являться альтернативой плотным асфальтобетонам при устройстве нижних конструктивных слоев покрытий автомобильных дорог с высокой грузонапряженностью и интенсивностью движения.

Для устройства оснований, как правило, применяют высокопористый асфальтобетон, который применяют в конструкциях с однослойным и двухслойным асфальтобетонным покрытием взамен всех типов оснований из укрепленных или неукрепленных каменных материалов.

Основание из высокопористого асфальтобетона допускается устраивать при условии соблюдения толщины асфальтобетонных слоев (покрытие + основание). Так для IV категории дорог общая толщина, покрытия из зернистого основания составляет 20 см, а для песчаного 18 см [30].

На дорогах III–IV категории при устройстве основания из высокопористого асфальтобетона допускается замена покрытия из плотного асфальтобетона слоем износа, устраиваемым способом поверхностной обработки из высокопрочного щебня. При применении в основаниях крупно- или среднезернистого высокопористого асфальтобетона покрытие рекомендуется проектировать минимальной конструктивной толщины, а при устройстве основания из высокопористого песчаного асфальтобетона толщина покрытия (из зернистого асфальтобетона) должна быть не менее 10 см на дорогах I – II категорий и на городских магистралях, проектируемых под автомобильную нагрузку Н-30 и Н-10, и не менее 6 см на дорогах III–IV категорий.

Отличительной чертой применения высокопористого асфальтобетона является то, что в его составе допускается использование: гравийно-песчаных материалов (при устройстве несущих слоев оснований на дорогах всех категорий); щебня пониженной прочности; смеси из природного и дробленого песка. При этом, обеспечивается снижение расхода битума при сохранении общей надежности конструкции в 1,5–2 раза по сравнению с пористым асфальтобетоном, а также повышении

теплоизолирующих свойств дорожной одежды. Это способствует: снижению толщины морозозащитного слоя, а в некоторых случаях и вовсе его исключения; повышению теплофизической совместимости слоев покрытия и основания, что увеличивает трещиностойкость покрытия.

Высокоплотный асфальтобетон разработан позже предыдущих с целью одновременного повышения сдвигоустойчивости, водостойкости и морозостойкости асфальтобетонных покрытий [31]. Он включает необходимый для создания каркаса объем щебня (55–65 %), ограниченное количество преимущественно мелкого песка и высокое содержание минерального порошка (10–16 %).

По физико-механическим свойствам и применяемым в его составе компонентам на основании ГОСТ 9128–2013 асфальтобетон принято делить на три марки:

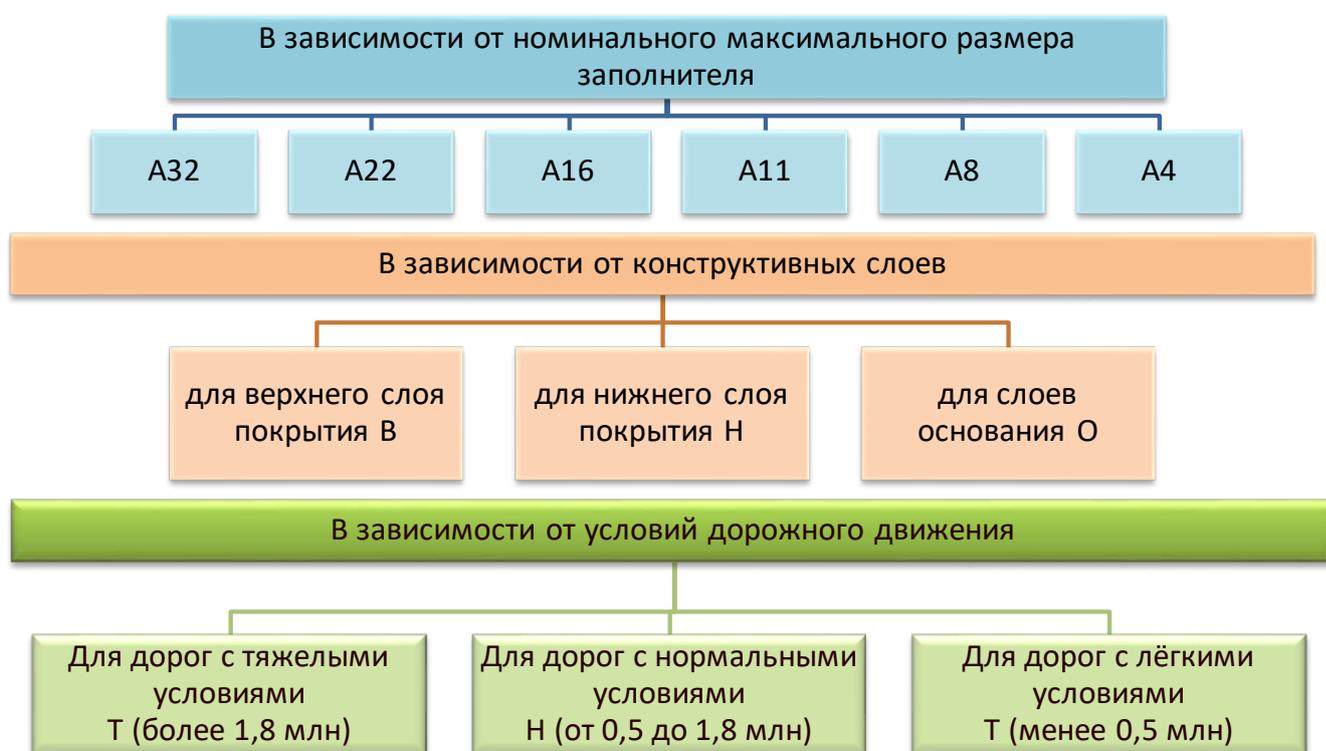
– к марке I относят горячие смеси: высокоплотные; плотные типа А, Б, Г; пористые; высокопористые щебеночные. Холодные смеси: типа Бх, Вх, Гх; высокопористые щебеночные. В составе марки I допускается применение: битумной эмульсии, песка, щебня и минерального порошка. Отличительной особенностью является минимальное количество щебня – не менее 40 % в зависимости от типа асфальтобетона [32, 33]. Сфера применения данной марки весьма широка – от тротуаров до автомобильных дорог. Рекомендуется использовать для дорог с высокой интенсивностью движения и нагрузкой в связи с его высокой прочностью и износостойкостью;

– к марке II также относят горячие смеси: плотные типа А, Б, В, Г, Д; высокопористые песчаные, холодные смеси: типа Бх, Вх, Гх, Дх. Для марки II характерны несколько сниженные технические показатели износостойкости [34, 35], прочности. Но покрытия устойчивы к перепаду температур, нагрузкам, подходят для разных климатических условий;

– к марке III относят горячие смеси: плотные типа Б, Г, В, Д. Материалы этой марки характеризуются низкими показателями прочности [36]. Это связано с тем, что в составе асфальтобетонов отсутствует щебень. Для повышения прочности в его составе используют добавки. Такой асфальтобетон подходит для ремонтных работ (заделка трещин, ям и т.д.), устройства тротуаров, а также дорог с небольшой

нагрузкой за счет высокой плотности.

Согласно более современному нормативному документу ГОСТ Р 58406.2–2020 [37] асфальтобетонные смеси разделили на виды по новым параметрам (рисунок 1.5). Компонентный состав асфальтобетона остается в данном случае неизменным, но пропорции подбирают совершенно по-другому. Классификация учитывает: номинальный максимальный размер зерен заполнителя; конструктивный слой (верхний/нижний слой покрытия/основания); условия эксплуатации (тяжелые, нормальные, легкие). То есть впервые появляется конкретная база для расчета и проектирования конструкции дорожной одежды.



**Рисунок 1.5** – Классификация асфальтобетонных смесей по ГОСТ Р 58406.2–2020

Так в зависимости от номинально максимального размера применяемого минерального заполнителя асфальтобетонные смеси подразделяют на типы: А32 – смеси с номинально максимальным размером применяемого минерального заполнителя 31,5 мм; А22 – 22,4 мм; А16 – 16,0 мм; А11 – 11,2 мм; А8 – 8,0 мм; А5 – 5,6 мм.

Асфальтобетоны А32 и А22, предназначенные для тяжёлых условий движения, применяемые в основании, имеют одинаковый гранулометрический состав с

асфальтобетонами, принятыми для нормальных условий в слоях основания [38].

Содержание щебня у указанных асфальтобетонов колеблется в пределах от 45 до 68 %, что соответствует крупнозернистым асфальтобетонам типов А, Б, а также пористым и высокоплотным по ГОСТ 9128–2013 [39]. Однако содержание воздушных пустот колеблется от 3 до 7 %, что исключает сопоставление данных асфальтобетонов (А32ОТ, А32ОН, А22ОТ, А22ОН) с высокоплотным асфальтобетоном (1,0–2,5 %) [40].

Асфальтобетоны, применяемые в нижних слоях покрытия и предназначенные для лёгких условий движения, имеют максимальную крупность до 11,2; 16 и 22 мм. При этом содержание воздушных пустот в асфальтобетоне А11 – от 2,5 до 5,0 % [41], поэтому он сопоставим с плотным асфальтобетоном. Асфальтобетоны А22 и А16 имеют остаточную пористость, соответствующую граничным значениям пористых и плотных асфальтобетонов – от 3,5 до 5,5 %.

Предусмотренные для использования в нижних слоях покрытия дорог с лёгкими условиями движения асфальтобетоны представлены составы с крупностью от А22 до А5. Щебенистость асфальтобетонов А22НЛ и А16НЛ 40–63 масс.%, А11 – 35–58 %, А5 – 15–38 % [42]. Поэтому асфальтобетоны А22 сопоставимы с пористым крупнозернистым асфальтобетоном и асфальтобетонами типа А и Б.

Асфальтобетон А16, предназначенный для нижних слоёв покрытия при тяжёлых условиях эксплуатации, можно соотнести к мелкозернистым асфальтобетонам по наибольшему размеру зерна, но учитывая содержание щебня (50–68 %) данный асфальтобетон можно сопоставить с мелкозернистым асфальтобетоном типа А, который имеет 50–60 % щебня и остаточную пористость в диапазоне 2,5–5,0.

В зависимости от конструктивного слоя дорожной одежды, асфальтобетонные смеси (смеси) подразделяют на виды:

– О – смеси для слоя основания. Применяют для создания нижнего слоя дорожной одежды, который обеспечивает прочность и устойчивость покрытия. Характеризуются высокой прочностью, крупным размером зерен щебня и низким содержанием битума;

– Н – смеси для нижнего слоя покрытия. Используют для создания промежуточного слоя между основанием и верхним слоем покрытия. Характеризуются средней прочностью, средним размером зерен щебня и умеренным содержанием битума;

– В – смеси для верхнего слоя покрытия. Используются для создания верхнего слоя дорожной одежды, который непосредственно контактирует с колесами транспортных средств. Характеризуются высокой водонепроницаемостью, износостойкостью, шероховатостью и низким уровнем шума. Могут содержать полимерные добавки и другие модификаторы.

В зависимости от условий дорожного движения смеси подразделяют на:

– Л – смеси для дорог с легкими условиями движения (до 0,5 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя). Характеризуются меньшей прочностью и долговечностью по сравнению с другими типами смесей;

– Н – смеси для дорог с нормальными условиями движения (от 0,5 до 1,8 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя). Характеризуются средней прочностью и долговечностью;

– Т – смеси для дорог с тяжелыми условиями движения (более 1,8 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя). Характеризуются высокой прочностью и долговечностью, а также устойчивостью к образованию колеи и другим видам повреждений.

Новый подход к нормированию требований к зерновым составам минеральной части асфальтобетонных смесей в ГОСТ Р 58406.2–2020 гармонизирует стандарты на асфальтобетон с перечнем нормативных документов и существенно упрощает проектирование, производство и контроль качества асфальтобетонных смесей, так как лабораторные сита по форме соответствуют сеткам, установленным в грохотах асфальтобетонных заводов.

Таким образом, в результате анализа существующих классификаций асфальтобетонов для дорожного строительства установлено, что независимо от норматив-

ного документа они основаны на различных критериях, таких как назначение, состав, свойства, как каждого компонента смеси, так и конечного композита. При этом, как состав, так и характеристики асфальтобетонов, применяемых в различных слоях конструкций дорожных одежд, в зависимости от вида вяжущего или его комплексного использования со вспомогательными компонентами, могут меняться в широком диапазоне. В результате для подбора оптимальных рецептурно-технологических факторов переработки/регенерации асфальтобетона из существующих конструктивных слоев для достижения экстремальных значений физико-механических и эксплуатационных характеристик требуется комплексный подход, подразумевающий многокритериальную оценку исходного сырья.

## **1.2 Технологические особенности способов регенерации асфальтобетонных покрытий**

Ежегодно, с учетом непрерывно растущих потребностей населения, количество транспортных средств на дорогах многократно увеличивается. Дорожная сеть, выполняя функцию сообщения для различных сфер, является важнейшей частью экономики государства в связи чем возникает необходимость в её постоянном улучшении. В совокупности с погодно-климатическими условиями эксплуатации, увеличение интенсивности движения, скорости и грузоподъемности транспортных средств приводит к существенному повышению нагрузки на дорожное полотно, которая, как правило, превышает проектные значения эксплуатируемых объектов. Это приводит к существенному снижению срока эксплуатации из-за появления дефектов в конструктивных слоях дорожных одежд, которое сказывается на удобстве, безопасности движения и общей скорости транспортных потоков, а также ведет к увеличению частоты ремонтных работ и реконструкции.

В рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги», направленного на развитие транспортной инфраструктуры, увеличение срока службы дорожного покрытия, а также поддержание безопасности на дорогах и ка-

чественного их обслуживания, в 2024 году было освоено свыше 279,34 млрд рублей, которые были реализованы на строительство и реконструкцию федеральных автомобильных дорог общей протяженностью более 618,3 километров и укладку верхнего слоя дорожного покрытия более 119,22 млн м<sup>2</sup> (рисунок 1.6) [43].



**Рисунок 1.6** – Статистические данные о реализации национального проекта «Безопасные качественные дороги» [43]

В нынешних реалиях надежность, простота и доступность технологических решений, их экономичность и экологичность, являются решающими факторами при обосновании проектов. Продление срока службы уже имеющихся материалов в конструкции с этой позиции является оптимальным. При этом, исходя из их текущих свойств важно подобрать эффективные технологии, которые позволят устранить существующие проблемы, при минимальных временных и ресурсозатратах.

Современные конструкции автомобильных дорог преимущественно нежесткого типа, в слоях покрытий которых применяют асфальтобетон различных марок в зависимости от их категории. Именно асфальтобетонные слои больше других подвержены непосредственному воздействию совокупности всех неблагоприятных

факторов, а, следовательно, появлению дефектов и дальнейшему разрушению. Так, в связи с необходимостью решения задач по повторному использованию изношенных асфальтобетонных покрытий более 20 лет назад, в дорожном строительстве появилось новое понятие – регенерация [44–46].

Регенерация асфальтобетона имеет множество преимуществ. Она позволяет использовать старый материал, который удаляют с поверхности дороги, что снижает затраты на строительство дорог и количество отходов. Это положительно влияет на окружающую среду, сокращается время ремонта, улучшаются характеристики дорожного полотна, в результате чего снижается риск возникновения аварий на дорогах и увеличивается срок службы дорог, так как они становятся более прочными и устойчивыми к внешним воздействиям.

В настоящее время вопросы технологических особенностей регенерации асфальтобетона с позиции применения механизмов и оборудования нашли широко применяемые решения, о чем свидетельствует наличие научно-технической литературы, рекомендаций по применению и нормативной документации. Однако, для достижения экстремальных значений физико-механических и эксплуатационных характеристик конечных материалов зачастую требуется анализ состава исходного органоминерального материала и разработка рецептуры модернизированного, зачастую требующая введения вспомогательных компонентов в процессе восстановления покрытия.

В России наиболее известными исследователями в области регенерации асфальтобетонных покрытий являются: Алиев А.М., Сюньи Г.К., Гезенцевей Л.Б., Бахрах Г.С., Гладышев Н.В., Лупанов А.П., Силкин В.В. и др. [47–53].

Алиев А.М., Сюньи Г.К. установили целесообразность восстановления дорожного покрытия с применением в составе смеси асфальтогранулята. Сюньи Г.К. рассмотрел технологию горячей регенерации и ее типы (виды, способы), выявил как положительные, так и отрицательные характеристики данной технологии, предложив альтернативу в виде холодной регенерации.

Гезенцевей Л.Б., Бахрах Г.С. в ряде своих работ объяснили зависимость гра-

нулометрического состава фрезерованного асфальтобетона от прочности щебня содержащегося в составе и скорости фрезерования покрытия. Также Бахрах Г.С. установил эффективность добавления в состав асфальтобетона асфальтогранулята в количестве около 25 %.

Гладышев Н.В. разработал способ повышения плотности и прочности асфальтогранулобетона, за счёт разделения асфальтогранулята на фракции, отбора фракции до 40 мм, нагрева до температуры 60–70 °С и добавления пластифицирующей добавки.

Несмотря на результаты отечественных исследований, технологии регенерации старого асфальтобетона в России все еще на начальном этапе развития и не получили такого широкого применения, в то время как за рубежом объём регенерированного асфальтобетона, который повторно использовался



**Рисунок 1.7** – Применение регенерированного асфальта в европейских странах (2023 г.) [54]

для производства различных видов асфальтобетона составляет 76 % от общего объёма переработанного асфальтобетона (рисунок 1.7) [54].

Регенерация асфальтобетонных покрытий представляет собой комплексный процесс, направленный на восстановление или улучшение первоначальных структуры и свойств асфальтобетона путём его переработки с добавлением вяжущих материалов и других компонентов, в результате чего продлевается срок службы дороги. Важным этапом для успешной регенерации асфальтобетона является рассмотрение и оценка имеющейся информации, в том числе оценка состояния су-

ществующего дорожного покрытия, технический анализ и анализ планируемых затрат, чтобы выбрать подходящий метод восстановления. Кроме того, должны учитываться схема дорожного движения, климатические условия и другая проектная информация [55]. Далее выбирается стратегия регенерации, которая должна учитывать обозначенные эксплуатационные характеристики асфальтобетона, приобретенные после регенерации. В ходе проведения работ необходимо использовать качественные материалы и оборудование, необходимо строго соблюдать технологию регенерации. Нарушение этих требований может привести к снижению качества регенерированного покрытия и сокращению его срока службы. Важно помнить регенерация асфальтобетона также имеет некоторые ограничения и не всегда может быть применима к сильно повреждённым покрытиям.

Методы регенерации разделяют на две группы: холодная и горячая регенерация [56–58]. Каждый из этих методов имеет свои характерные преимущества и недостатки, которые стоит учитывать. Дорожные инженеры, используя данные методы, часто модифицируют перерабатываемую смесь для улучшения её конечных свойств, добавляя в её состав органические и неорганические модификаторы [59–60]. Однако следует отметить, что регенерация не всегда может полностью восстановить или улучшить первоначальные характеристики асфальтобетона, поэтому важно проводить регулярный мониторинг и обслуживание дорожных покрытий.

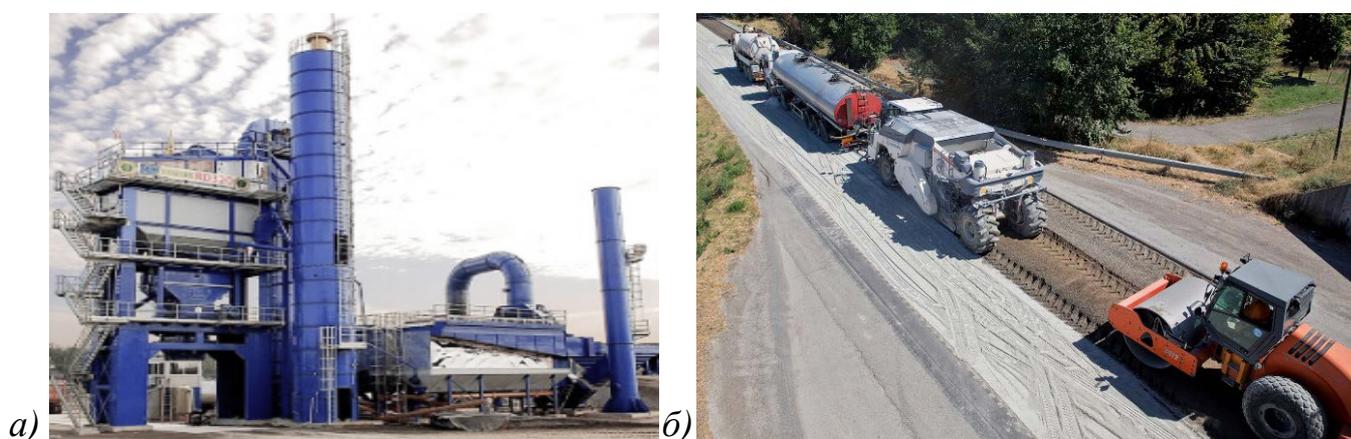
Как говорилось выше, классифицировать методы регенерации можно разделив их на две основные группы: холодная регенерация и горячая регенерация, которые в свою очередь тоже делятся на способы.

В последние годы методы холодной регенерации широко используются во всем мире благодаря экологичности [61]. Холодная регенерация представляет собой технологию восстановления асфальтобетонного покрытия при температуре окружающей среды без необходимости нагревания его до высокой температуры ( $>120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), как это делается в процессе горячей регенерации [62]. Принцип холодной регенерации заключается в том, что старое асфальтобетонное покрытие измельчается и смешивается с новыми материалами (битумом, эмульсией, добавками) для получения нового слоя покрытия. Полученный слой имеет свойства, близкие к

свойствам нового асфальтобетона.

Холодная регенерация включает в себя три основных метода: холодную переработку на месте, холодную централизованную переработку на заводе и рекультивацию на полную глубину.

Регенерация методом холодной переработки на месте, как правило, проходит непосредственно на участке реконструируемой дороги [63], начиная с измельчения асфальтобетона заканчивая смешиванием измельченного асфальта с добавками и последующем уплотнении. В целом такой способ довольно прост. Первым делом производится визуальный осмотр дефектного участка асфальтобетона с целью получения информации о состоянии его поверхности. Устанавливается толщина асфальтового покрытия, которая будет перерабатываться. Проводится отбор проб асфальтового покрытия, и проводятся лабораторные исследования по определению прочности на сжатие, прочности на растяжение, модуля упругости, определяется количественное содержание битума и его структурно-механические характеристики (вязкость, пенетрация, температура размягчения и др.). Затем слой асфальта фрезеруется на необходимую глубину, чтобы создать ровную поверхность обычно толщина составляет от 50 до 125 мм. Это позволяет подготовить поверхность для последующей обработки. Оборудование для переработки асфальтобетона может представлять собой один механизм или состав из нескольких единиц дорожно-строительной техники (рисунок 1.8).



**Рисунок 1.8** – Оборудование для холодной регенерации

*a* – АБЗ; *б* – цепочка машин с ресайклером

Асфальтобетон с помощью дробилки или режущего барабана измельчается до нужной фракции таким образом, чтобы 100 % материала проходило через сито диаметром 45 мм [64]. Смешивание вяжущего с асфальтобетонным гранулятом (измельченный асфальтобетон) может происходить в режущем барабане и/или в измельчительной машине. Кроме того, вводятся корректирующие функциональные добавки, которые смешиваются с переработанным материалом для придания смеси специальных свойств. После завершения смешивания всех компонентов смеси переработанный материал укладывается на то место, откуда был извлечен. При использовании данной технологии укладка переработанной смеси требует больше сил для уплотнения, чем при укладке обычных горячих битумных смесей. Однако, как правило, достаточно использовать тяжелый пневматический каток в сочетании с большим двухбарабанным вибрационным дорожным катком.

Преимущества данного способа в том, что легко устраняются такие дефекты как: выбоины, колеи, трещины, благодаря чему продлевается срок службы полотна. Кроме того, он менее энергозатратен по сравнению с другими, а также позволяет существенно сократить сроки реализации ремонта полотна и его стоимость [65].

Холодная регенерация на заводе, подразумевает снятие старого асфальтового покрытия и его доставки на специальный завод для дальнейшей переработки с использованием холодных технологий или возможно использование современного мобильного завода способного полностью заменить асфальтосмесительный завод [66]. Этот метод широко применяется для регенерации больших объемов асфальтобетона, снятого при реконструкции или ремонте дорог [67]. Данный процесс проходит в несколько этапов. Вначале происходит фрезерование поврежденного участка асфальтобетона. Существующий асфальтобетон снимается с дороги с помощью фрезерных машин, после чего транспортируется и складывается на заводе. Доставленный асфальтогранулят исследуют и составляют рецептуру смеси, благодаря чему повышается уровень надежности при последующей укладке. На заводе старый асфальтобетон проходит процесс холодной переработки, материал размельчается, производится сортировка, очистка от загрязнений и смешивание с добавками и вяжущими материалами. Готовая смесь транспортируется с завода на место

укладки или может храниться в специальном бункере непродолжительное время. Укладка асфальтобетонного материала в слои конструкции производится с использованием обычных асфальтоукладчиков, но можно также использовать автогрейдеры.

Рекультивация асфальтобетона на полную глубину – это способ регенерации дорожных покрытий, который включает в себя полное измельчение до однородного размера и смешивания асфальтового покрытия и заданной части слоев, находящихся ниже его со связующими веществами и другими добавками. Процесс начинается с фрезерования верхнего слоя асфальта и части подстилающего основания, подосновы и/или грунтового слоя, после чего происходит добавление порошкообразного или жидкого связующего соединения и других добавок для получения улучшенного однородного материала [68]. Затем материал тщательно смешивается и укладывается, чтобы создать новый и укрепленный слой асфальтобетона. Наконец, стабилизированный материал уплотняется на месте катками для обеспечения однородности материала. Результатом является жесткое, стабилизированное основание с улучшенными прочностными характеристиками, готовое для нового жесткого или гибкого слоя поверхности [69]. После смешивания и укладки может потребоваться дополнительная обработка, такая как наложение дополнительного слоя асфальтобетона на поверхность или финишная обработка для улучшения финального качества дорожного покрытия.

Учитывая современные мировые тенденции в ценовом увеличении дорожно-строительных материалов, и ориентации на ресурсосбережение внедрение технологий горячей регенерации асфальта является одним из путей решения проблемы [70].

В отличие от холодной регенерации методы горячей основаны на предварительной термической обработке асфальтового покрытия. При этом важно разогреть асфальт до температуры, при которой его будет легко переработать, но при этом не перегреть вяжущее, нарушив его структуру и свойства, которые значительно ухудшаются при неправильной термической обработке. В зависимости от способа при-

готовления различают технологию приготовления горячих регенерированных асфальтобетонных смесей на заводе и непосредственно на месте. Согласно мировой практике дорожного строительства, технология горячей переработки дорожного асфальта на месте классифицируется как: *Remix*, *Remix plus*, *Repave*, *Reshape*.

Способ термопрофилирования применяют для покрытия, не требующего повышения характеристик и на автомобильных дорогах с небольшой интенсивностью [71], так как толщина покрытия, укладываемого указанным способом, составляет 4–6 см. Данный способ целесообразно применять при обнаружении таких дефектов, как колейность, продольные и поперечные трещины, неровность покрытий, также ремонту термопрофилированием подлежат асфальтобетонные покрытия с водонасыщением не более 4 % [72]. В процессе данного метода дорожное покрытие нагревается до тех пор, пока его температура не достигнет 120–180 °С. Затем материал фрезеруется на глубину до 20–60 мм, измельчается и после чего горячая смесь укладывается на место ранее снятого дорожного слоя и уплотняется. Возможно добавление добавок, если есть признаки старения битума.

Способ термосмешивания характеризуется разрыхлением старой смеси и перемешиванием с новой асфальтобетонной смесью [73], также данный способ называют *Remix*. Метод применим для ремонта при различных дефектах или устройства верхнего слоя асфальтобетонного покрытия, но его особенностью по сравнению с другими методами является эффективное применение при выпотевании битума.

Технология регенерации асфальтобетона методом термосмешивания включает в себя разогрев старого асфальтобетона до 150–250 °С, затем старый слой асфальтобетона фрезеруют перемешивают с новой смесью, распределяют и в дальнейшем уплотняют на дороге.

Разновидностью способа термосмешивания является способ термопластификации, основанный на смешивании регенирированной смеси с добавлением пластификатора влияющего на свойства битума, добавление новой смеси не обязательно. В качестве пластификатора используют масла нефтяного происхождения в диапазоне 0,1–0,6 % [74].

Отличительной особенностью способа термоукладки является добавление

новой смеси в виде дополнительного слоя усиления или защитного слоя асфальтобетона [75] толщина слоя составляет 1,5–3 см, но новая смесь не перемешивается со старой асфальтобетонной смесью.

Для усиления дорожной одежды применяют способ термоусиления, особенностью которого является высокое содержание новой смеси асфальтобетона по сравнению с добавленной регенерированной смесью. При этом возможно, что поверхность слоя, содержащего в составе асфальтогранулят может быть уложен слой асфальтобетонного покрытия [76].

По способу горячей централизованной переработки на заводе старый асфальтобетонный материал снимается с дороги путем фрезерования, после чего полученный лом доставляется на завод. После доставки гранулят дополнительно подвергается дроблению для получения зерен необходимого размера. Далее подготовленный материал подвергается нагреву до 120–170 °С, на специализированном заводском оборудовании и смешивается в соответствии с рецептом с новым битумом и различными добавками главным образом с пластификатором для восстановления пластичности битума. Полученная смесь транспортируется обратно к месту, где её ранее сняли, и нагревается до высокой температуры, после чего наносится на дорогу для создания нового покрытия. Однако необходимо отметить, что важными критериями для получения качественной смеси являются продолжительность и температура нагрева [77].

Таким образом, обобщенный анализ исследований в области применяемых способов регенерации асфальтобетона, показывает, что повышение эффективности дорожных покрытий, в частности путем применения переработанного асфальтобетона в составе новой смеси, является эффективным технологическим решением. Одним из наиболее распространенных и простых способов является холодная регенерация на месте или на заводе, подразумевающая снятие и измельчение асфальтобетона, смешение его с другими компонентами и уплотнение смеси. Холодная регенерация является энергоэффективным способом, не требующим затрат на нагрев, обеспечивающим заданные физико-механические и эксплуатационные свойства конечного материала.

### 1.3 Функциональное назначение асфальтогранулята в составе новых композитов

На сегодняшний день в связи с непрерывным ростом объемов строительства автомобильных дорог, наблюдается увеличение объемов потребления традиционного минерального сырья. Это связано с необходимостью строительства новых, ремонта и реконструкции существующих автомобильных дорог для приведения в соответствие нормативным требованиям. В тоже время, возросший дефицит минерального сырья и ухудшение экологической обстановки требуют альтернативных решений, обеспечивающих качественную замену применяемому сырью. В связи с этим в отрасли дорожного строительства непрерывно возрастает интерес к вторичному и техногенному сырью, как возможной частичной или полной замены компонентов в составе органоминеральных композитов.

Следует отметить, что согласно Федеральному закону № 268-ФЗ от 14.07.2022 введено такое понятие, как *вторичное сырье* – продукция, полученная из вторичных ресурсов непосредственно (без обработки) или в соответствии с технологическими процессами, методами и способами, предусмотренными документами в области стандартизации РФ, которая может использоваться в производстве другой продукции и (или) иной хозяйственной деятельности. Также общепризнано [78–80], что *техногенное сырьё* – это конкурентоспособный, перспективный, постоянно пополняемый ресурс, которому, как правило, относят отходы производства, используемые в качестве минерального сырья (отходы горнодобывающей, металлургической, топливно-энергетической и химической промышленности).

На основании вышеизложенного следует, что асфальтобетонный гранулят (АГ), полученный в результате фрезерования старого асфальтобетонного покрытия, является вторичным сырьем. Использование асфальтогранулята обладающего схожим составом с асфальтобетоном может обеспечить замену традиционному минеральному сырью в виде щебня [81], что положительно отразится на экономической и экологической эффективности дорожного строительства, а также на ресурсосбережении.

К нормативным документам, в которых отражены методы контроля асфальтогранулята и его применение в составе органоминерального композита: транспортировка и хранение, агрегатный состав, зерновой состав, определение свойств органического вяжущего и других показателей, можно отнести следующие:

– ГОСТ Р 55052–2012 «Гранулят старого асфальтобетона. Технические условия»;

– ОДМ 218.6.1.005–2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации»;

– ГОСТ Р 59118.1–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Переработанный асфальтобетон (РАР). Технические условия»;

– ГОСТ Р 70197.1–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Общие технические условия»;

– ГОСТ Р 70197.2–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Методы испытаний»;

– ГОСТ Р 70197.3–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Правила производства работ».

Согласно ГОСТ 55052–2012 асфальтогранулят классифицируют по содержанию инородных включений и примесей, при этом возможность применение асфальтогранулята оценивается зерновым составом и содержащимся битумным вяжущим.

Асфальтогранулят полученный путем измельчения изношенных слоев асфальтобетона обладает рядом преимуществ – высокая прочность и устойчивость к деформациям, трещинообразованию, термическая стойкость, что обеспечивает долговечность покрытий, в тоже время материал характеризуется низким модулем упругости, что может привести к снижению долговечности, нестабильность связующего, что приводит к понижению водостойкости.

Технология применения вторичного сырья в виде асфальтобетонного гранулята в составе различных видов асфальтобетонных смесей приобрела известность с 1979 года, когда на одной из площадок ОАО «АБЗ-1» выпускали асфальтобетонные смеси с использованием вторичного асфальтобетона [82], что связано с успехами в развитии технологий и оборудования для повторного применения асфальтобетона.

Сфера применения асфальтогранулята обширна. Основным направлением применения асфальтогранулята является ремонт и строительство дорожных покрытий, но его также применяют при устройстве укрепленных обочин автодорог и верхнего слоя дорожной одежды на стоянках и временных площадках [83].

Для дорог пятой категории в случае ремонта обочин можно использовать до 100 % АГ (верхний слой покрытия) [84]. Дорожное покрытие из асфальтогранулята по сравнению с гравийными дорогами, не только более плотное, но и за счёт содержания в составе органического вяжущего обеспечивает пылеподавление.

При укреплении обочин автомобильных дорог требования к материалам несколько ниже, чем у применяемых для дорожного полотна, но при этом материалы должны обеспечить способность обочин выдерживать нагрузку и не деформироваться. Укрепленные обочины дороги обеспечивают повышение прочности грунтового основания на 6–8 % [85], что значительно увеличивает долговечность покрытия. При укреплении обочин слоем асфальтогранулобетона, толщина слоя которого составляет не более 0,2 м [86], устойчивость к деформациям обеспечивается за счет содержания в АГ двух компонентов – щебня и битума, так как щебень является прочным материалом, что придает прочность композиту, и битум покрывая другие компоненты за счет своей гидрофобности не позволяет разрушить структуру композита и всего дорожного покрытия.

В верхнем слое основания асфальтогрануляты применяют для частичной или полной замены щебня. При содержании АГ в диапазоне 0–30 % прочность возрастает более интенсивно, при добавлении АГ более 30 % процесс замедляется [87]. Таким образом, применение асфальтобетонного гранулята способствует скреплению слоя и обеспечивает максимальную прочность и устойчивость к деформациям.

Однако известно [88–92], что асфальтогранулят без использования различных добавок не обладает большой эффективностью при введении его в состав дорожных композитов, чаще всего это происходит из-за старения битума, так как с течением времени улетучиваются легкие углеводороды, происходит накопление тяжёлых фракций, что вызывает быстрое старение органического вяжущего и повышение вязкости битума, в дальнейшем это приводит к образованию различных дефектов, трещин и колееобразованию покрытия. Таким образом введение добавок для обработки асфальтогранулята позволяет применять его в различных видах асфальтобетона и в слоях покрытий.

Так, подтверждена возможность применения асфальтогранулята как заполнителей в составе литого серного бетона [93,94]. Взаимодействие серного цемента с асфальтогранулятом снижает водонасыщение литого бетона [93], обеспечивая этим устойчивость к разрушению. По мнению другого автора, повышение технологических свойств литой смеси возможно при содержании в смеси 30 % асфальтогранулята и добавки дефлегматора Sasobit, снижающей вязкость битума [94], что делает смесь удобоукладываемой.

Помимо этого, процентное содержание асфальтогранулята в смеси зависит от состава основной асфальтобетонной смеси. Количественный диапазон применения асфальтогранулята в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона варьируется в широком диапазоне. Например, в работе [95] АГ добавлялся с шагом 4 % до 20 % от всего состава и в результате составы ЩМА содержащие АГ до 16 % характеризуются повышением таких показателей, как предел прочности при сжатии, водостойкость, а также снижением водонасыщения. При 20 % содержании АГ водонасыщение возрастает, что способствует отслаиванию битумных пленок и вызывает ослабление структурных связей в асфальтобетоне [96].

В работе [97] при добавлении 35 % асфальтогранулята в состав горячей крупнозернистой пористой асфальтобетонной смеси, наблюдалось повышение водостойкости, что характерно для данной смеси, так как при нагреве возрастает адсорбция битума и при нагреве органическое вяжущее более однородно обволакивает заполнители, но происходит его разрушение, что негативно влияет

на показатель трещиностойкости.

Зависимость от содержания АГ на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных смесей изучалось многими исследователями [98–100]. В случае колееобразования добавление АГ позволяет улучшить показатель из-за добавления органического вяжущего [100], так как образуются новые соединения. Хотя это улучшение во многом зависит от свойств и содержания АГ, так добавление 25–30 % может привести к увеличению сопротивления колееобразованию [100]. Также на устойчивость к колееобразованию асфальтобетона влияет фракция щебня, содержащегося в АГ (5–20 мм).

В случае с усталостными характеристиками (усталостная долговечность) асфальтобетона с добавлением АГ существует небольшое соответствие. Хотя показатель усталостной долговечности в условиях испытаний с постоянной деформацией [101] улучшается из-за содержания в АГ крупного заполнителя – щебня, но при этом ухудшается при более высоком процентном содержании АГ, так как из-за большего содержания состаренного битума уменьшается сопротивление высоким температурам.

При низком содержании АГ свойства асфальтобетонов не сильно отличаются по сравнению со смесями без переработанных заполнителей; таким образом, присутствие АГ считают незначительным [102]. Лупанов А.П. в своих исследованиях установил, что пороговое значение находится в пределах от 10 % до 20 % содержания АГ в зависимости от жесткости старого связующего [103], смесь при 20 % АГ имеет высокие прочностные показатели при меньшей их слеживаемости. Однако при более высоком содержании АГ физико-механическое поведение асфальтобетонных смесей с АГ обычно показывает повышенную жесткость, что может привести к образованию трещин, если не вносить коррективы в состав смеси.

Что касается долговечности покрытия, то содержание АГ обеспечивает упрочнение структуры и заполнение пустот за счёт содержащегося органического связующего в АГ, также с увеличением органического вяжущего увеличивается его толщина и больше зерен покрыто вяжущим, что положительно влияет на водостойкость и в совокупности на долговечность.

Основной негативный фактор обусловленный высоким содержанием АГ в смесях в основном связан с состаренным связующим. Менее пластичное связующее в АГ обычно увеличивает жесткость смеси и, следовательно, может вызывать дефекты и трещины, а также хрупкость при низких температурах. Например, использование смесей с содержанием АГ 55 % характеризуется увеличением жесткости покрытия на 25–60 % по сравнению с чистыми смесями [104]. При этом смесь с добавлением 50 % АГ [105] характеризуется снижением показателя водонасыщения и повышением водостойкости конечного материала.

Шипицын В.В. [106] рассмотрел применение 100 % асфальтогранулята совместно с добавками при холодной регенерации асфальтобетона на дороге, сравнил применение асфальтогранулобетона (АГБ), содержащего медленноотвердеющие минеральные вяжущие и состав с цементом. АГБ с цементом хоть и обладают повышенной прочностью, но с течением времени снижается трещиностойкость и материал отличается невысокой морозостойкостью. Эффективность АГБ с медленноотвердеющими минеральными вяжущими, объясняется тем, что коагуляционная структура сохраняется дольше.

Применение асфальтогранулята в комплексе со шлаком не получило распространение, хоть их взаимодействие обеспечивает повышение показателей асфальтогранулобетона. Основными характеристиками, которыми обладает асфальтогранулобетон при добавлении сталеплавильного шлака к асфальтогрануляту [107, 108] является повышенный модуль упругости, влагостойкость и усталостная прочность. Однако совместное применение асфальтогранулята и сталеплавильного шлака может негативно повлиять на прочностные характеристики покрытия, так как шлак имеет не высокую активность, поэтому для повышения активности применяют добавки, которые в свою очередь могут негативно влиять на взаимодействие асфальтогранулята и шлака. Чтобы предотвратить отрицательное воздействие на эксплуатационные характеристики асфальтобетонной смеси, процентное содержание асфальтогранулята должно быть тщательно подобрано. При использовании асфальтогранулята с активированным доменным шлаком в основании дорожной одежды повышается трещиностойкость композита [109].

Асфальтогранулят применяют в качестве крупного заполнителя для замены традиционного сырья в бетонных смесях, что относит их к малоподвижным и подвижным. Несмотря на то, что АГ дает более низкую прочность, чем бетон с традиционным заполнителем, но достаточное содержание компонентов среднего размера, может помочь в изготовлении плотного бетона, что позволяет достигать достаточную прочность для ряда бетонов.

Асфальтогранулят так же применяют при укреплении грунтов [110]. Так укрепленный цементом песчаный грунт АГ добавляют в диапазоне 5–45 %, заменяя количество грунта, наблюдается максимальный коэффициент морозостойкости.

Первые методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации, в которых появились требования к АГБ, были разработаны в 2002 году. Эти рекомендации были позже заменены на ОДМ 218.6.1.005-2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации», который устанавливает современные требования к материалам и методам оценки их физико-механических характеристик. Одним из ключевых изменений, предусмотренных данным документом, является переход от традиционного показателя – предела прочности при сжатии при температуре 20 °С и 50 °С в возрасте 1 и 7 суток, к пределу прочности при непрямом растяжении. Кроме того, согласно ОДМ 218.6.1.005-2021 в зависимости от используемого вяжущего асфальтогранулобетонную смесь (АГБС) классифицируют на следующие типы: с добавлением битумной эмульсии (АГБС-Э), вязкого вспененного битума (АГБС-В), минерального вяжущего (АГБС-М) и комплексного вяжущего (АГБС-К). В то же время наравне с применяемым нормативным документом действует ГОСТ Р 70197.1–2022, который распространяется на органоминеральные смеси с применением вторичного асфальтобетона. В рамках данного стандарта органоминеральную смесь классифицируют по виду используемого вяжущего на: использование минеральных вяжущих (М) или комплексных вяжущих (К). Классификация способствует расширению технологических возможностей и выбору оптимального состава в зависимости от условий эксплуатации.

Проведенный форсайт-анализ возможности и эффективности повторного применения асфальтобетона в виде асфальтобетонного гранулята в составе дорожных композитов позволил установить широкое разнообразие вариантов его использования в сочетании с различными вновь вводимыми компонентами для улучшения свойств получаемых конечных композитов. Отмечается, что возможно совместное использование асфальтобетонного гранулята с техногенным сырьем, однако опыт исследований свидетельствует о необходимости глубокого комплексного анализа свойств сырьевых компонентов для прогнозирования их влияния на свойства конечных композитов и тщательного анализа рецептурно-технологических факторов их получения для достижения комплекса заданных свойств.

#### **1.4 Опыт применения зол-уноса в составе дорожно-строительных композитов**

В настоящее время в виду повышенных экологических рисков большое внимание уделяется процессу утилизации техногенных отходов, в состав которых входят золошлаковые отходы (ЗШО). По данным Ассоциации развития вторичного использования сырья на территории РФ накоплено 1,5 млрд тонн ЗШО [111], что является одной из причин негативного влияния на окружающую среду, в результате возник вопрос их утилизации. Сокращение объёмов ЗШО возможно при использовании их в отраслях промышленности, где основной потребляемой отраслью является строительство, что позволит снизить себестоимость производства, сократить выбросы парниковых газов и повысить прочность композиционных материалов, также обеспечить эффективное ресурсосбережение, заменив традиционное природное сырьё (рисунок 1.9).

Большой интерес среди ЗШО представляют золы-уноса (ЗУ), отвечающие экономическим, экологическим и технологическим критериям среди которых: тонкодисперсная структура, высокая удельная поверхность, адаптивность и наличие активных химических компонентов. Это позволяет использовать золы-уноса как в

виде компонента самостоятельного вяжущего, так и в качестве минеральной добавки или активного компонента для разных типов вяжущих систем.



Рисунок 1.9 – Область применения зол-уноса [111]

Рост объемов дорожного строительства и необходимость в повышении экологической составляющей строительства делает золу-уноса ценным материалом для дорожного строительства с возможностью применения для укрепления и стабилизации грунтов, производства асфальтобетонных, цементобетонных смесей и реализации технологий ресайклинга. Использование зол-уноса представляет собой экономически эффективную и экологически целесообразную альтернативу.

Ввиду универсальности зол-уноса они могут применяться в дорожном строительстве с неорганическими и органическими вяжущими. Ниже рассмотрены особенности использования зол-уноса с каждым типом вяжущего.

В качестве *неорганических вяжущих* веществ в дорожном строительстве выступают портландцемент, известь, гипс, шлак и другие материалы. В основном неорганические вяжущие вещества применяются для модификации дорожных композитов и стабилизации грунтовых оснований, где золы-уносы выступают как структурообразующие компоненты, обеспечивающие за счет своих пуццолановых или гидравлических свойств повышение физико-механических характеристик.

Влияние зол-уноса на композит при частичной замене ими цемента изучено ранее [112–113], так себестоимость цементной смеси может с частичной заменой

на золу-уноса может снизиться на 15–20 %. Зола-уноса, как пуццолановый материал, активно взаимодействует с продуктами гидратации цемента, особенно с гидроксидом кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), который образуется при реакции воды с клинкерными минералами цемента. Свободная известь высвобождается во время гидратации цементного клинкера и активирует пуццолановую реакцию с золами-уноса [114], формируя стабильные соединения в виде устойчивых низкоосновных форм гидросиликатов кальция [115].

При введении зол-уноса в состав грунтобетона стоит учитывать к какому типу они относятся (низкокальциевые, высококальциевые), так введение высококальциевой золы-уноса в состав грунтобетона обеспечивает изменение физико-механических свойств, так как за счёт своей гидратационной активности при взаимодействии с грунтом в присутствии воды формировали затвердевшую структуру [116].

Исследования грунтобетониров с цементом и золой-уноса на геотехнические свойства имеют обширную базу результатов [117]. При определении плотности отмечается ее увеличение за счет распределения зольных частиц в смесях, что уменьшает количество пустот, а, следовательно, улучшается несущая способность. Предел прочности и пластичности грунта при увеличении доли золы в цементе поначалу увеличивается, но по достижении примерно 20 % начинает уменьшаться. Между тем, при добавлении золы-уноса и цемента также снижается способность грунтов к набуханию примерно на 30 %. Также золу-уноса применяют в качестве мелкодисперсного инертного структурирующего материала при укреплении несвязных грунтов [118], способную улучшить поровую структуру, прочность, водо- и сдвигоустойчивость получаемого конструкционного слоя автомобильной дороги за счет высокой удельной площади поверхности своих частиц.

Научные исследования по их совместному использованию показали, что замена до 30 % цемента в цементобетоне на золу-уноса позволяет обеспечить достижение прочности на сжатие до 75 МПа. Однако оптимальное количество золы-уноса зависит не только от способа применения, но и от состава и пропорций всех сырьевых материалов в бетонной смеси (особенно золы-уноса), условий укладки (в

частности температуры), строительных норм и условий эксплуатации, и, таким образом, содержание зол-уноса в цементной смеси может достигать до 50 %.

В качестве *органических вяжущих* веществ в дорожном строительстве используется битум и другие производные материалы на его основе – битумная эмульсия, полимерно-битумные композиции и др. Они служат основой для устройства асфальтобетонных покрытий, холодного ресайклинга и поверхностной обработки дорог. Однако в последние годы всё чаще возникает вопрос о модификации этих вяжущих с использованием техногенных материалов, таких как зола-унос. Зола-уноса может применяться в сочетании с органическими вяжущими, особенно в технологии холодного ресайклинга, где она выполняет роль минерального наполнителя и регулятора процессов структурообразования. Научные исследования, опубликованные в открытых источниках, подтверждают, что добавление золы-уноса в органические вяжущие системы повышает прочность асфальтобетонов на 25–30 % [119], снижает водопоглощение и увеличивает срок службы покрытий. Отмечается также и положительный экономический эффект – снижение стоимости смесей на 20 % и более [120], что делает технологию особенно привлекательной для бюджетных проектов.

Битум является наиболее распространенным органическим вяжущим в производстве асфальтобетонных смесей для устройства покрытий автомобильных дорог. За счёт своих адгезионных свойств он «склеивает» и закрепляет оптимально подобранный минеральный остов композиций, представленный крупным и мелким заполнителями, наполнителем и функциональными добавками, например, такими как зола-уноса. Взаимодействие битума с золой основано на явлении адсорбции. Мелкие частички зольного порошка увеличивают площадь контакта между битумом и минеральным заполнителем, делая смесь более стабильной и устойчивой к воздействию воды [121]. Кроме того, активные оксиды кремния и алюминия, входящие в состав золы, могут взаимодействовать с полярными группами битума, повышая его вязкость и устойчивость к старению в летний и снижая хрупкость вяжущего в зимний период. Таким образом, зола-уноса становится не просто

наполнителем, а активным участником формирования объемной структуры асфальтобетона [122]. Модификация битума золой-уноса влияет на эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Так пористость золы-уноса определяет её способность вмещать в поровую структуру больше битум, то есть напрямую влияет на битумоемкость смеси, а размер пор в общей пористости материала влияет на вязкость битума и в дальнейшем определяет устойчивость к деформациям. При этом совместное применение в составе асфальтобетона обеспечивает адгезию крупного заполнителя, в результате увеличения площади взаимодействия минерального материала с битумной пленкой, что положительно влияет на водостойкость покрытия.

При холодной регенерации асфальтобетона применение битумной эмульсии с золой-уноса делает позволяет быстро восстанавливать покрытия без необходимости перевозки материалов на полигоны или заводы. Роль золы-уноса в холодной переработке многогранна: зола не только поглощает свободную воду, ускоряя коагуляцию эмульсии, но и заполняет микропоры, повышая плотность уложенного слоя. Такое совместное использование оправдано как в слое основания дороги, так и при устройстве верхних слоев дорожной конструкции. Особое внимание уделяется применению катионных битумных эмульсий ввиду положительно заряженных частиц в их составе прекрасно взаимодействующих с щебнем и песком, которые часто имеют отрицательный заряд поверхности. Опыт стабилизации грунтовых оснований с низкой несущей способностью при использовании эмульсии в сочетании с золой-уноса отмечается повышение несущей способности до 50 %. Ввиду того, что зола в ходе коагуляции и твердения смеси проявляет как гидравлические, так и пуццолановые свойства, это дает возможность получить большой запас прочности конструктивного слоя, но и повышает его водно-физические свойства в результате консолидации. При правильно подобранном диапазоне дозировок максимальная плотность, объемная плотность, пористость и морозостойкость смесей, подразумевающих комплексное использование вяжущих в сочетании с золами-уноса, удовлетворяет нормативным требованиям. Установлено, что зола-уноса может повышать прочность и устойчивость к деформациям асфальтобетонных смесей.

Таким образом, проведенный анализ опыта применения зол-уноса в составе композиционных материалов для дорожного строительства, как в виде функциональных компонентов минеральной части, так и регуляторов свойств применяемых вяжущих, показал положительные результаты, обуславливающие разнообразие вариантов использования зол-уноса различного состава для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик. Наряду с улучшением свойств композиционных материалов, практическое применение в дорожном-строительстве позволяет существенно повысить экономическую эффективность общей стоимости строительства, обусловленной корректировками конструктивных особенностей, приводящих к снижению потребления традиционного сырья при обеспечении надлежащего качества конструкций.

### **1.5 Выводы**

1. В результате анализа существующих классификаций асфальтобетонов для дорожного строительства установлено, что независимо от нормативного документа они основаны на различных критериях, таких как назначение, состав, свойства, как каждого компонента смеси, так и конечного композита. При этом, как состав, так и характеристики асфальтобетонов применяемых в различных слоях конструкций дорожных одежд, в зависимости от вида вяжущего или его комплексного использования со вспомогательными компонентами, могут меняться в широком диапазоне. В результате для подбора оптимальных рецептурно-технологических факторов переработки/регенерации асфальтобетона из существующих конструктивных слоев для достижения экстремальных значений физико-механических и эксплуатационных характеристик требуется комплексный подход, подразумевающий многокритериальную оценку исходного сырья.

2. Обобщенный анализ исследований в области применяемых способов регенерации асфальтобетона, показывает, что повышение эффективности дорожных покрытий, в частности путем применения переработанного асфальтобетона в составе новой смеси, является эффективным технологическим решением. Одним из

наиболее распространенных и простых способов является холодная регенерация на месте или на заводе, подразумевающая снятие и измельчение асфальтобетона, смешение его с другими компонентами и уплотнение смеси. Холодная регенерация является энергоэффективным способом, не требующим затрат на нагрев, обеспечивающим заданные физико-механические и эксплуатационные свойства конечного материала.

3. Проведенный форсайт-анализ возможности и эффективности повторного применения асфальтобетона в виде асфальтобетонного гранулята в составе дорожных композитов позволил установить широкое разнообразие вариантов его использования в сочетании с различными вновь вводимыми компонентами для улучшения свойств получаемых конечных композитов. Отмечается, что возможно совместное использование асфальтобетонного гранулята с техногенным сырьем, однако опыт исследований свидетельствует о необходимости глубокого комплексного анализа свойств сырьевых компонентов для прогнозирования их влияния на свойства конечных композитов и тщательного анализа рецептурно-технологических факторов их получения для достижения комплекса заданных свойств.

4. Проведенный анализ опыта применения зол-уноса в составе композиционных материалов для дорожного строительства, как в виде функциональных компонентов минеральной части, так и регуляторов свойств применяемых вяжущих, показал положительные результаты, обуславливающие разнообразие вариантов использования зол-уноса различного состава для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик. Наряду с улучшением свойств композиционных материалов, практическое применение в дорожном-строительстве позволяет существенно повысить экономическую эффективность общей стоимости строительства, обусловленной корректировками конструкционных особенностей, приводящих к снижению потребления традиционного сырья при обеспечении надлежащего качества конструкций.

## 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 2.1 Методы исследований

Комплексные исследования в рамках представленной диссертационной работы как сырьевых компонентов, так и составов асфальтогранулобетона в рамках научной работы носят междисциплинарный характер. В этой связи анализ проб вторичного (асфальтогранулят) и техногенного (золы-уноса) сырья производился с использованием широкого спектра методик и оборудования как в рамках нормативных требований, так и на основании научно-признанных методов. Экспериментальные исследования осуществлялись с применением современных инструментов и поверенного испытательного аналитического оборудования материально- и научно-технической базы Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова:

- кафедры «Материаловедение и технологии материалов»;
- кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина»;
- Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для установления возможности повторного применения *асфальтобетонного гранулята* в составах дорожно-строительного композита, согласно нормативной документации, определялись следующие его характеристики:

- *зерновой состав проб асфальтобетонного гранулята* определяли в соответствии с ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний»;
- *количество органического вяжущего* определяли методом выжигания согласно ГОСТ 58401.15–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Определение содержания, битумного вяжущего методом выжигания»;
- *комплекс базовых свойств минеральной части (модуль крупности, остаток на сите № 063, истинная плотность, полные остатки на ситах, содержание*

*зерен пластинчатой и иглообразной формы, марка по дробимости щебня из гравия и гравия, марка по истираемости, морозостойкость, содержание естественных радионуклидов)* асфальтобетонного гранулята оценивали на основании ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»;

– *степень старения битума*, содержащегося в пробах асфальтобетонного гранулята и изменения его состава и структурных свойств, осуществлялась за счет разделения битума на фракции и определения их количества (метод отмывки и экстрагирования), а также с применением ИК-спектроскопии;

– *структура проб асфальтобетонного гранулята* оценивалась визуально с помощью оптического микроскопа ПОЛАМ-Р 312.

Ввиду отсутствия нормативной базы, регулирующей использование *зол-уноса* в составе дорожно-строительных материалов [123], эффективность их использования в сочетании с органическим вяжущим оценивалась в соответствии с ГОСТ 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей», а в сочетании с неорганическим вяжущим – в соответствии с ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия».

На ряду со стандартными методами определения физико-механических и физико-химических свойств зол-уноса определялась *площадь удельной поверхности* с помощью прибора ПСХ-12(SP), а также на приборе Sorbi M, позволяющем определить *нанопористость* по методу БЭТ.

*Гранулометрический состав* зол-уноса определялся с помощью лазерного анализатора Analysette 22 NanoTec Plus в диапазоне измерений от 0,01 до 2000 мкм.

Анализ *химического состава* зол-уноса производился с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL 9900 WorkStation.

Для определения *минерального состава* применяли рентгеновский дифрак-

тометр серии ARLX'TRA (Cu-анод) (Thermo Fisher Scientific; расшифровку и обработку рентгенограмм проводили с использованием программного обеспечения WinPLOT и DifWin.

*Морфоструктурные особенности* зол-уноса и цементного камня с их использованием изучались с использованием растровой электронной микроскопии высокого разрешения в условиях вакуума на приборе Tescan Mira 3 LMU.

Так как методы в рамках нормативной документации не дают возможности в полной мере оценить характер взаимодействия и процессы, протекающие при взаимодействии зол-уноса с вяжущим, а также установить возможность применения без дополнительной обработки, в рамках диссертационного исследования применялся комплекс методик, регламентируемых отечественной и зарубежной нормативной документацией, а также научно-признанных [124–129]:

- тест Фраттини (EN 196–5:2011) [124];
- упрощённый тест Фраттини [125];
- метод Чапеля (NF P18–513) [126];
- определение  $t$ -критерия (ГОСТ 25094–2015) [127];
- определение конца схватывания и водостойкости смеси минеральной добавки с известью (методика Бутта Ю.М. и Тимашева В.В.) [128];
- определение содержания  $\text{CaO}_{\text{св}}$  ускоренным методом (ГОСТ 25818–2017) [129].

*Тест Фраттини*, регламентируемый EN 196–5:2011 «Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement», предполагает определение концентраций  $\text{CaO}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , содержащихся в портландцементе и исследуемых минеральных добавках. Согласно методике 20 г пробы смешивали со 100 мл воды. Затем закрытые ёмкости помещали в сушильный шкаф при 40 °C и хранили 8 сут. После чего растворы охлаждали при комнатной температуре и фильтровали. Далее в 50 мл отфильтрованного раствора добавляли 5 капель индикатора – метилового оранжевого и определили общую щелочность с помощью 0,1 М HCl. Окончание титрования оценивали визуально в результате изменения цвета с жёлтого на оранжевый. После титрования в растворы добавляли NaOH для повышения pH среды

до 12,5.

Содержание гидроксильной группы рассчитывали по формуле 2.1:

$$[OH^-] = \frac{1000 \cdot 0,1 \cdot V_3 \cdot f_2}{50} \quad (2.1)$$

где  $V_3$  – объем раствора HCl, используемого для титрования, мл;  $f_2$  – коэффициент 0,1 М раствора HCl.

Концентрацию оксида кальция определяли фотометрическим методом. В растворы добавляли 2–3 капли индикатора эриохром Т, затем помещали в кюветы спектрофотометра. После каждого измерения добавляли раствор ЭДТА с шагом 0,5 мл, измеряя оптическую плотность при  $\lambda = 522$  нм. Построив кривые на графике зависимости объёма раствора ЭДТА от полученной оптической плотности, определяли пик, характеризующий максимальный объём ЭДТА использованный для титрования.

Содержание оксида кальция рассчитывали по формуле 2.2:

$$[CaO] = 0,6 \cdot V_4 \cdot f_1 \quad (2.2)$$

где  $V_4$  – объем раствора ЭДТА, используемого для титрования, мл;  $f_1$  – коэффициент раствора ЭДТА.

Активной следует считать добавку, которая находится ниже кривой изотермы растворимости.

*Определение концентраций  $Ca^{2+}$  и  $OH^-$* , также производили методом поглощения добавкой извести из известкового раствора. Методика представляет собой *упрощённый тест Фраттини* и заключается в том, что 1 г добавки добавляли к 75 мл насыщенного раствора извести. Образцы выдерживали в сушильном шкафу при 40 °С в течение 1, 3, 7 и 28 сут. для дальнейшего титрования. Расчёт  $Ca^{2+}$  и  $OH^-$  проводился по методике, указанной в описании теста Фраттини.

Снижение содержания  $Ca(OH)_2$  при взаимодействии с кремнистыми и алюмосиликатными материалами определяли *методом Чапеля*, согласно стандарту NF P18–513 «Pozzolanic addition for concrete – Metakaolin – Definitions, specifications and conformity criteria». По методике 1 г минеральной добавки добавляли к 250 мл

дистиллированной воды, содержащей 2 г извести. Смесь непрерывно перемешивали в течение 16 ч при 90 °С. После перемешивания в растворы добавляли по 250 мл сахарозы, перемешивали 10 мин и отбирали для титрования 25 мл каждой пробы.

Пуццолановую активность рассчитывали по формуле 2.3:

$$PA = 2 \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot \frac{74}{56} \cdot 1000 \quad (2.3)$$

где  $V_1$  – объем HCl, используемый для титрования 25 мл контрольного раствора, мл;  $V_2$  – объем HCl, используемый для титрования 25 мл раствора с добавкой, мл.

Активность минеральных добавок в виде зол-уноса ТЭС определялась двумя физико-механическими методами.

Ключевой особенностью определения *t-критерия* является определение прочности на сжатие по ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка» после пропарки уже через 24 ч с момента изготовления образцов. Расчет *t-критерия*, характеризующего активность золы, производили на основании разности значений прочности на сжатие образцов из смесей с золами и образцов из смеси с песком по формуле 2.4:

$$t = 2,45 \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_I}{\sqrt{\frac{S_A^2 - S_I^2}{2}}}, \quad (2.4)$$

где  $\bar{X}_A$  и  $\bar{X}_I$  – средние арифметические значения пределов прочности на сжатие образцов, изготовленных из смесей с одной из зол и песком;  $S_A^2$  и  $S_I^2$  – квадраты средних квадратических отклонений предела прочности на сжатие образцов, изготовленных из смесей с одной из зол и песком.

*Методика определения конца схватывания и водостойкости смеси минеральной добавки с известью* заключается в оценке проявления гидравлических свойств и обеспечения водостойкости смеси добавки с гашеной известью [124]. Для испытания были подготовлены составы смесей, включающих добавку и известь в соотношении 4:1 (зола : известь), в качестве контрольного выступал состав с использованием цемента (цемент : известь = 4:1). Для подготовки составов смесей с каждой добавкой было подобрано водовязущее отношение. Согласно методике, смесью с

нормальной густотой заполняли по два кольца Вика, выровняв и закрыв их с обеих сторон стеклянными пластинами для предотвращения поглощения углекислоты из воздуха. Далее образцы помещали в гидравлическую ванну с затвором и хранили в помещении с комнатной температурой. Через 24 ч после затворения по одному кольцу каждого состава извлекали из ванны и определяли сроки схватывания. Измерение производили один раз в сутки и продолжали до тех пор, пока пестик не переставал погружаться в смесь. Промежуток времени от начала затворения состава смеси водой до конца испытания считается сроком конца схватывания. Второй образец каждой смеси, предварительно извлеченный из кольца, использовали для определения водостойкости. Минеральную добавку следует считать активной, если конец схватывания наступает не позднее 7 сут. с момента затворения смеси водой, а также если образцы в течение 3 сут. нахождения в воде не размываются и сохраняют четкость форм, т.е. целостность.

*Подбор составов асфальтогранулобетона и определение физико-механических свойств* осуществлялись в соответствии с ГОСТ Р 70197.2–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Методы испытаний» и ОДМ 218.6.1.005–2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации».

Кроме того, для установления *рациональных границ варьирования* рецептурно-технологическими факторами при проектировании асфальтогранулобетонов в работе использовалось программное обеспечение SigmaPlot.

*Проектирование конструкций дорожных одежд* с использованием различных составов асфальтогранулобетона осуществлялось с помощью программы «КРЕДО РАДОН».

Таким образом, в рамках диссертационного исследования применен комплекс современных методик и оборудования, позволяющих произвести многокритериальную оценку сырьевых компонентов и композиционных материалов на их основе, а также программные продукты для математического моделирования экс-

периментов и расчета конструкционных особенностей автомобильных дорог с целью установления экстремальных значений запаса прочности, определяющего долговечность конструкции.

## 2.2 Характеристика применяемых материалов

Объектами исследования явилось вторичное (асфальтогранулят) и техногенное (золы-уноса) сырье, а также асфальтогранулобетоны, получаемые с использованием асфальтобетонного гранулята взамен крупного заполнителя и зол-уноса как наполнителя, выполняющего функции регулятора процессов структурообразования при взаимодействии с различными видами вяжущих.

### 2.2.1 Асфальтогранулят

В качестве крупного заполнителя в работе проанализировано 4 пробы асфальтобетона (а/б) в виде асфальтобетонного гранулята, отличающиеся сроком эксплуатации (таблица 2.1).

**Таблица 2.1** – Пробы асфальтобетона, исследованные в работе

№ п/п	Марка а/б	Тип	Категория а/д	Срок службы а/б
1	II	Б	III	3 года
2	II	Б	III	12 лет
3	II	Б	IV	5 лет
4	II	Б	IV	10 лет

В связи с тем, что более 65 % автомобильных дорог характеризуются относительно низкой интенсивностью движения и относятся к III–IV технической категории наиболее распространенным материалом для устройства покрытий является асфальтобетон II марки типа Б.

### 2.2.2 Золо-уноса

В качестве наполнителей, которые при взаимодействии с различными видами вяжущих (битумная эмульсия/цемент) выполняют функции регуляторов структурообразования, в работе использовались различные типы зол-уноса (ЗУ), уже доказавшие свою эффективность в ранее проведенных исследованиях членов научной школы НШ-2584.2020.8 «Фундаментальные представления о типоморфизме минерального сырья как факторе структурообразования в процессах технологического петрогенеза строительных композитов» БГТУ им. В.Г. Шухова [130–135], в том числе при непосредственном участии соискателя [136–138]:

- кислые (или низкокальциевые):
  - зола-уноса Троицкой ГРЭС (1) (Челябинская обл.), полученная при сжигании каменного угля Экибастузского месторождения;
  - зола-уноса Рефтинской ГРЭС (Свердловская обл.), полученная при сжигании каменного угля Экибастузского месторождения;
- основная (или высококальциевая) зола-уноса Назаровской ТЭС (Красноярская обл.), полученная при сжигании бурого угля Ирша-Бородинского месторождения.

Однако следует отметить, что за период работы в рамках научной школы кафедры «Материаловедения и технологии материалов» по тематике, связанной с изучением различных видов зол-уноса (начиная с 2008–2010 гг.) в качестве базового сырья геополимерных вяжущих [139], а также активного минерального компонента как органических (битум, эмульсия) [135], так и неорганических (цемент) [133, 140] вяжущих количество видов зол-уноса, поступающих для изучения от различных поставщиков постепенно увеличивалось и потому изучение тех или иных сырьевых материалов проходило в различный временной период и, порой, с использованием различного оборудования и методик (спектр которых планомерно расширялся). Это позволило наработать обширный массив данных и, как следствие, позволило установить ряд закономерностей, с одной стороны, но и, с другой,

периодическое повторение тех или иных испытаний естественным образом выявило некие колебания в численных значениях, либо в пределах ошибок эксперимента, либо в более значимых расхождениях, в виду изменений в технологиях сжигания топлива или состава угля, что отразилось в результатах, приводимых в различных публикациях, в том числе с участием автора. Так, наиболее наглядные изменения в характеристиках зол-уноса были установлены у зол Троицкой ГРЭС, что нашло отражения в рамках данной работы.

В связи с тем, что на Троицкой ГРЭС (Челябинская обл.) проводилась смена с каменного угля Экибастузского месторождения на каменный уголь марки «Г» Кузнецкого месторождения и формировался новый отвал, было целесообразно отследить изменение свойств образующейся при сжигании топлива золы-уноса. В этой связи в данной работе приведены свойства как ранее формируемых в отвалах зол – далее назовем их зола-уноса Троицкой ГРЭС (1), так и действующих в настоящее время отвалов – далее назовем их зола-уноса Троицкой ГРЭС (2). При этом свойства ЗУ Троицкой ГРЭС (1) представлены в данной главе и для сравнения в главе 3, тогда как свойства ЗУ Троицкой ГРЭС (2) исследованы впервые в рамках данной работы, поэтому приведены в главе 3, а также использованы для разработки составов асфальтогранулобетона.

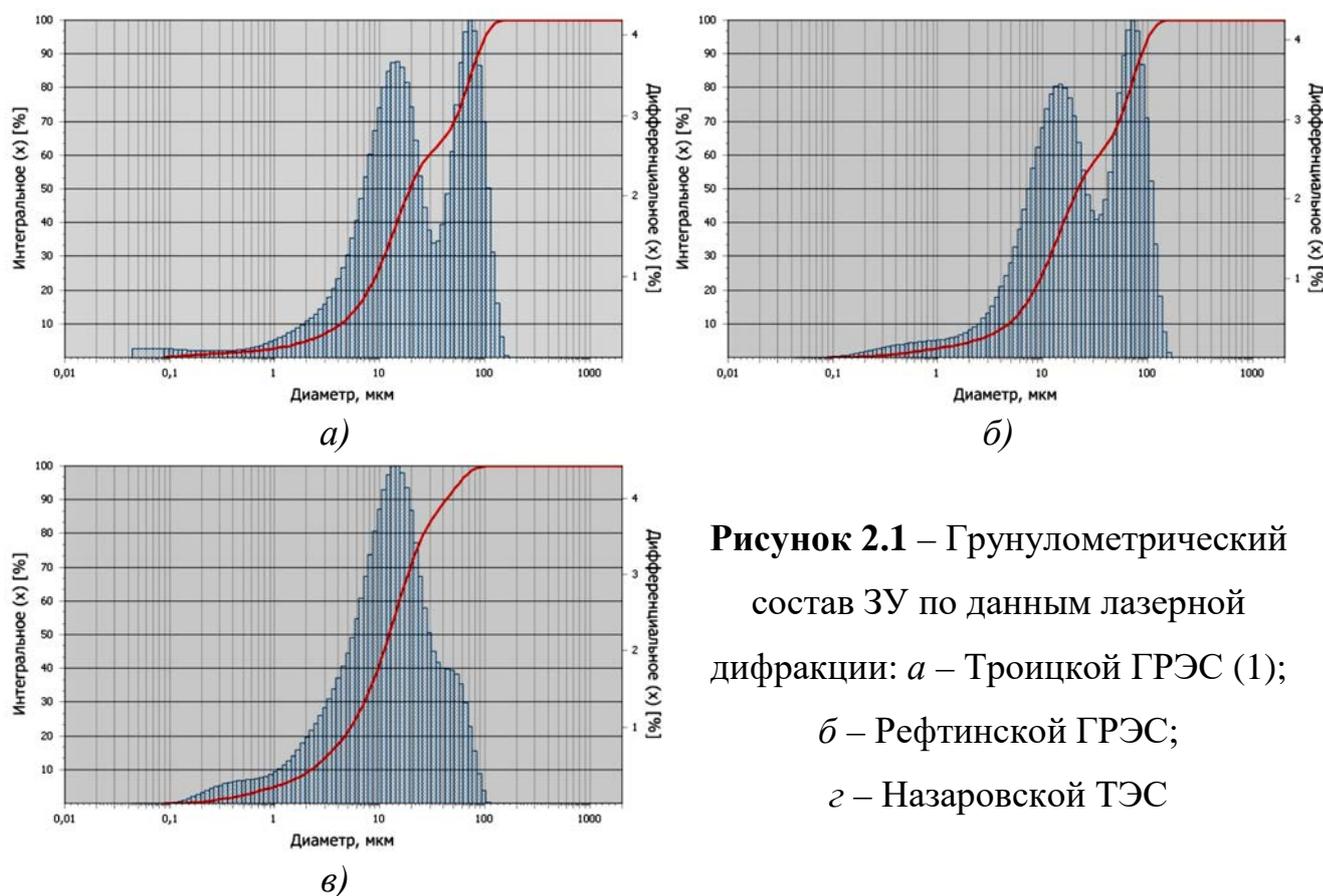
Вариативность свойств используемого техногенного сырья в виде зол-уноса представлена в таблицах 2.2–2.6 и на рисунках 2.1–2.4.

**Таблица 2.2** – Нормируемые свойства зол-уноса при использовании в составе систем, содержащих различные виды вяжущих

Наименование показателя	Нормируемые значения	Тип зол-уноса и источник получения		
		кислые		основная
		Троицкая ГРЭС (1)	Рефтинская ГРЭС	Назаровская ТЭС
Свойства зол-уноса в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003				

Наименование показателя	Нормируемые значения	Тип зол-уноса и источник получения		
		кислые		основная
		Троицкая ГРЭС (1)	Рефтинская ГРЭС	Назаровская ТЭС
Зерновой состав, (мм) % по массе:				
– <1,25	≥ 95	100	100	100
– <0,315	80–95	99,4	99,4	99,9
– <0,071	≥ 60	79	76,3	94,5
Пористость, %	≤ 40	43	36	42
Показатель битумоемкости, г/100 см <sup>3</sup>	≤ 80	84	51	59
Влажность, %	≤ 2,5	0,27	0,15	0,40
<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	449
Остаток на сите № 008, мас. %	< 15	15	17	0,5
Водопотребность, %	< 95	73	67	67
Индекс активности на 28 сут.	≥ 75	84	73	76
Индекс активности на 90 сут.	≥ 85	95	78	87
<i>по химическому составу (нормируемые значения для кислых/основных)</i>				
Содержание СаО, мас. %	≤10/≥10	0,61	1,28	37,80
Содержание MgO, мас. %	≤5	1,06	0,58	6,31
Содержание сернистых и сернокислых соед. в пересчете на SO <sub>3</sub> , мас. %	≤3	0,21	0,15	4,40
Содержание щелочных оксидов в пересчете на Na <sub>2</sub> O, мас. %	≤3/≤1,5	1,05	0,53	0,76
Содержание хлорид-ионов, мас. %	≤0,1	–	–	–

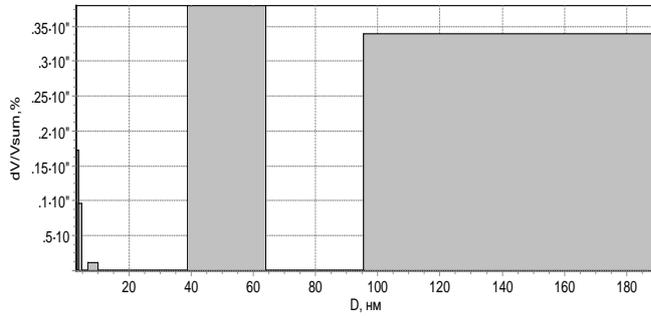
Наименование показателя	Нормируемые значения	Тип зол-уноса и источник получения		
		кислые		основная
		Троицкая ГРЭС (1)	Рефтинская ГРЭС	Назаровская ТЭС
Потеря массы при прокаливании	$\leq 5 / \leq 2$	4,59	1,90	3,15
Свойства зол-уноса в соответствии с ГОСТ 30108–94				
Эффективная удельная активность природных радионуклидов, Бк/кг	740	92±26	103±24	365±54



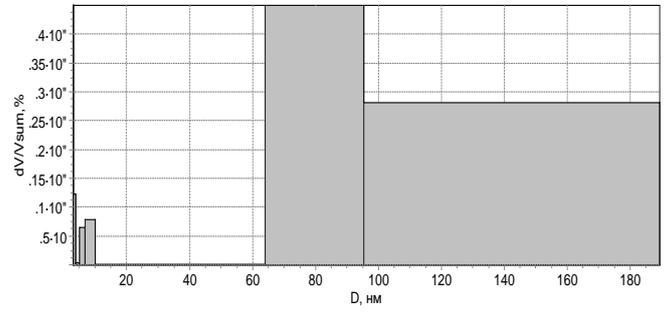
**Рисунок 2.1** – Грунулометрический состав ЗУ по данным лазерной дифракции: *a* – Троицкой ГРЭС (1); *б* – Рефтинской ГРЭС; *в* – Назаровской ТЭС

Так, согласно проведенным ранее исследованиям золы-уноса Троицкой ГРЭС (1) и Рефтинской ГРЭС целесообразно применять в сочетании с битумной эмульсией. В свою очередь, для асфальтогранулобетона с использованием битум-

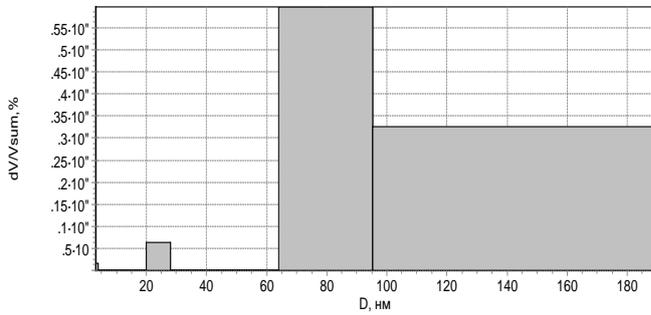
ной эмульсии/цемент или цемента, т.е. где присутствует как компонент неорганической вяжущее в виде цемента, целесообразно использовать золы-уноса Троицкой ГРЭС (1) и Назаровской ТЭС.



а)



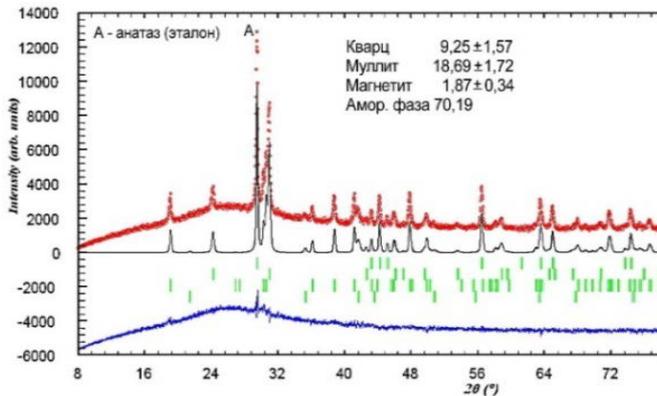
б)



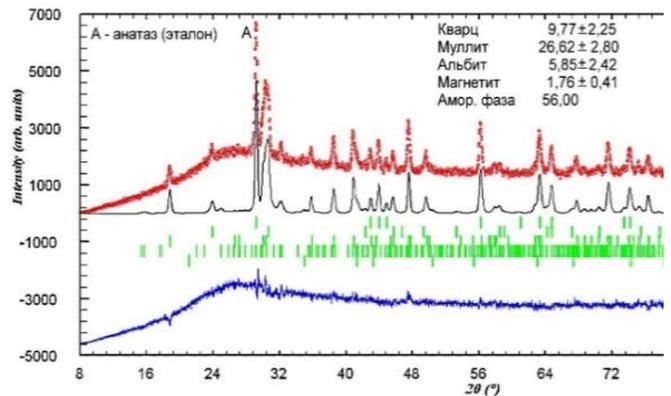
в)

**Рисунок 2.2 – Нанопористость зол-уноса различных типов по данным метода БЭТ:**

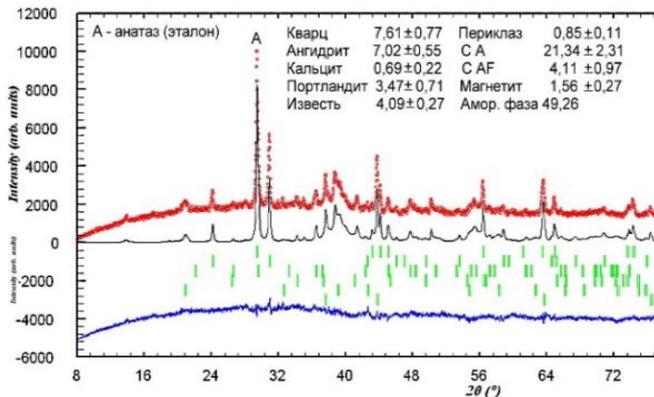
а – Троицкой ГРЭС; б – Рефтинской ГРЭС; в – Назаровской ТЭС



а)



б)



в)

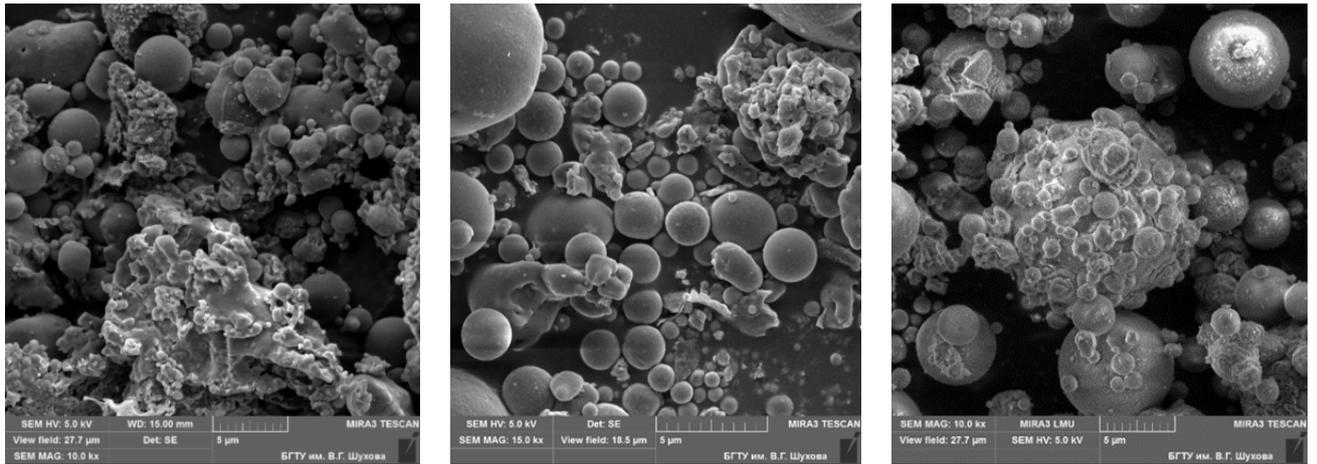
**Рисунок 2.3 – Минерально-фазовый**

зол-уноса по данным РФА:

а – Троицкой ГРЭС;

б – Рефтинской ГРЭС;

в – Назаровской ТЭС



а)

б)

в)

**Рисунок 2.4** – Морфоструктурные особенности зол-уноса:

а – Троицкой ГРЭС; б – Рефтинской ГРЭС; в – Назаровской ТЭС

**Таблица 2.3** – Химический состав зол-уноса по данным рентгенофлуоресцентного анализа

Источник получения ЗУ	Содержание, %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	п.п.п.	пр.
Троицкая ГРЭС (1)	62,53	28,75	0,61	4,10	0,21	1,06	1,05	0,29	4,95	1,40
Рефтинская ГРЭС	60,20	30,92	1,28	3,35	0,15	0,58	0,53	0,75	1,90	2,24
Назаровская ТЭС	31,55	8,84	37,80	8,99	4,40	6,31	0,76	0,20	3,15	1,15

**Таблица 2.4** – Критерии качества зол-уноса согласно классификации Галибиной Е.А.

Источник получения золы-уноса	Значение расчетного показателя				
	Mo	Mc	K	Kocн	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SO <sub>3</sub>
Троицкая ГРЭС (1)	0,03	1,9	0,5	0,27	136,9
Рефтинская ГРЭС	0,03	1,8	0,5	0,29	206,13

Источник получения зола-уноса	Значение расчетного показателя				
	Mo	Mc	K	Kocn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SO <sub>3</sub>
Назаровская ТЭС	1,1	1,8	1,7	0,38	2,01

**Таблица 2.5** – Коллоидно-химические свойства зол-уноса

Источник получения зола-уноса	Наименование и значение показателя		
	Водородный показатель, pH	Функция кислотности, H <sub>0</sub>	ζ-потенциал, мВ
Троицкая ГРЭС (1)	6,47	7,5	-6,61
Рефтинская ГРЭС	7,19	7,3	-4,45
Назаровская ТЭС	10,28	9,2	2,67

**Таблица 2.6** – Активность зол-уноса по отношению к Ca(OH)<sub>2</sub>,  
по данным различных методов анализа

Компонент	Количество активных бренстедовских кислотных центров, мг·экв/г	Количество поглощенного CaO по методу Запорожца, мг/г
Троицкая ГРЭС (1)	52,8	3,0
Рефтинская ГРЭС	44,9	2,5
Назаровская ТЭС	4,2	1

Для расширения номенклатуры сырьевой базы в части зол-уноса при получении дорожно-строительных материалов в работе дополнительно также изучены 2 новые золы (результаты анализа свойств которых выполнены в рамках данной работы и представлены в главе 3):

- кислая зола-уноса Кемеровской ГРЭС (Кемеровская обл.), полученная при сжигании каменного угля марки «Д» Кузнецкого месторождения;
- основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) (Челябинская обл.), полученная при сжигании каменного угля марки «Г» Кузнецкого месторождения.

### 2.2.3 Органическое вяжущее

В качестве органического вяжущего для приготовления асфальтогранулобетона применялась эмульсия битумная дорожная катионная медленнораспадающаяся марки ЭБДК-М производства ООО «Автодорстрой-подрядчик» г. Белгород, состав которой приведен в таблице 2.7. Применяемая эмульсия удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 55420–2013 «Дороги автомобильные общего пользования. Эмульсии битумные дорожные катионные Технические условия» (таблица 2.7, 2.8).

**Таблица 2.7** – Состав дорожной битумной эмульсии марки ЭБДК-М

Компоненты битумной эмульсии	Содержание, %
Битум БНД 70/100	60
Стабирам МС–6	0,8
Соляная кислота 30 %-ная	0,28
Вода	38,92

**Таблица 2.8** – Свойства дорожной битумной эмульсии марки ЭБДК-М

Показатель	Значения требуемые ГОСТ Р 58952.1-2020	Фактическое значение
Индекс распада при использовании песка кварцевого	>260	266
Содержание вяжущего с эмульгатором, %	58–62	59,8
Остаток на сите № 014, %, не более	0,25	0,10
Условная вязкость при 40 °С, с, не более	30	27
Остаток на сите № 014, после хранения 7 суток, %, не более	0,30	0,13
Устойчивость к расслоению, при хранении до 7 суток, %, не более	5	3,1
Адгезия к минеральному материалу,	50–100	75

Показатель	Значения требуемые ГОСТ Р 58952.1-2020	Фактическое значение
%, не более		

### 2.2.4 Неорганическое вяжущее

Наиболее распространенным видом вяжущего, которое позволяет создать плотную прочную структуру, является портландцемент. Так для получения асфальтогранулобетона в данной работе применялся цемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» г. Белгород, который соответствует требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» (таблица 2.9).

**Таблица 2.9** – Характеристики портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент»

Показатели	Значения
Класс прочности, МПа	42,5Н
Нормальная плотность, %	27
Прочность в возрасте 2 суток, МПа	19,65
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	320
Начало схватывания, мин	110
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов в цементе А/эфф, БК/кг	39,5

### 2.3 Выводы

1. Методологической основой работы является комплексный подход при исследовании состава и свойств сырья с целью выбора и ранжирования по эффектив-

ности использования в качестве функциональных компонентов (крупный заполнитель, наполнитель) в составе АГБ. Идея базируется на известной роли структурирующих минеральных компонентов в улучшении свойств вяжущих, применяемых в составе композиционных материалов дорожно-строительного назначения. В этой связи в рамках диссертационного исследования применен комплекс современных методик и оборудования, позволяющих произвести многокритериальную оценку сырьевых компонентов и композиционных материалов на их основе, а также программные продукты для математического моделирования экспериментов и расчета конструктивных особенностей автомобильных дорог с целью установления экстремальных значений запаса прочности, определяющего долговечность конструкции. Ключевые физико-механические свойства разработанных АГБ оценивались на основании ОДМ 218.6.1.005–2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации».

2. С целью снижения потребления традиционных минерально-сырьевых ресурсов для дорожного строительства в работе изучена широкая выборка вторичного и техногенного сырья в виде асфальтобетонного гранулята и зол-уноса. В качестве вторичного сырья в работе изучены свойства 4-х проб асфальтобетона (а/б) марки II, типа Б, отобранных на дорогах (а/д) III и IV категорий с разным сроком эксплуатации в виде асфальтобетонного гранулята (АГ). В качестве техногенного сырья в работе проанализированы свойства зол-уноса четырех производителей Троицкой ГРЭС (двух видов), Рефтинской ГРЭС, Назаровской ТЭС и Кемеровской ГРЭС.

3. 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».

### **3 ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОНА**

#### **3.1 Дизайн исследования для проведения сегментированного эксперимента**

Дизайн исследования представляет собой систему, состоящую из нескольких компонентов: 1) формулировки решаемой проблемы, цели исследовательских вопросов; 2) определения исследуемых переменных, гипотез, методов; 3) планирования эксперимента.

При создании композиционных материалов дорожно-строительного назначения традиционно решается ряд следующих задач:

- снижение расхода базовых минеральных материалов, а также вяжущих в составе органоминеральных композитов за счет частичной или полной замены на техногенные или вторичные материалы;
- повышение показателей его физико-механических свойств (последние предполагается анализировать для выявления дополнительных параметров структуры на макро- и микроуровнях);
- рациональное использование техногенных ресурсов различных производств (утилизация отходов) и продуктов вторичной переработки (использование переработанных материалов конструкций дорожных одежд).

В связи с вышеизложенным, ключевой задачей данного этапа работы являлась разработка методологии проектирования и технологии получения органоминеральных композитов на основе техногенного сырья и вторичных материалов, обеспечивающих технико-экономическую эффективность дорожно-строительных материалов при достижении заданных параметров.

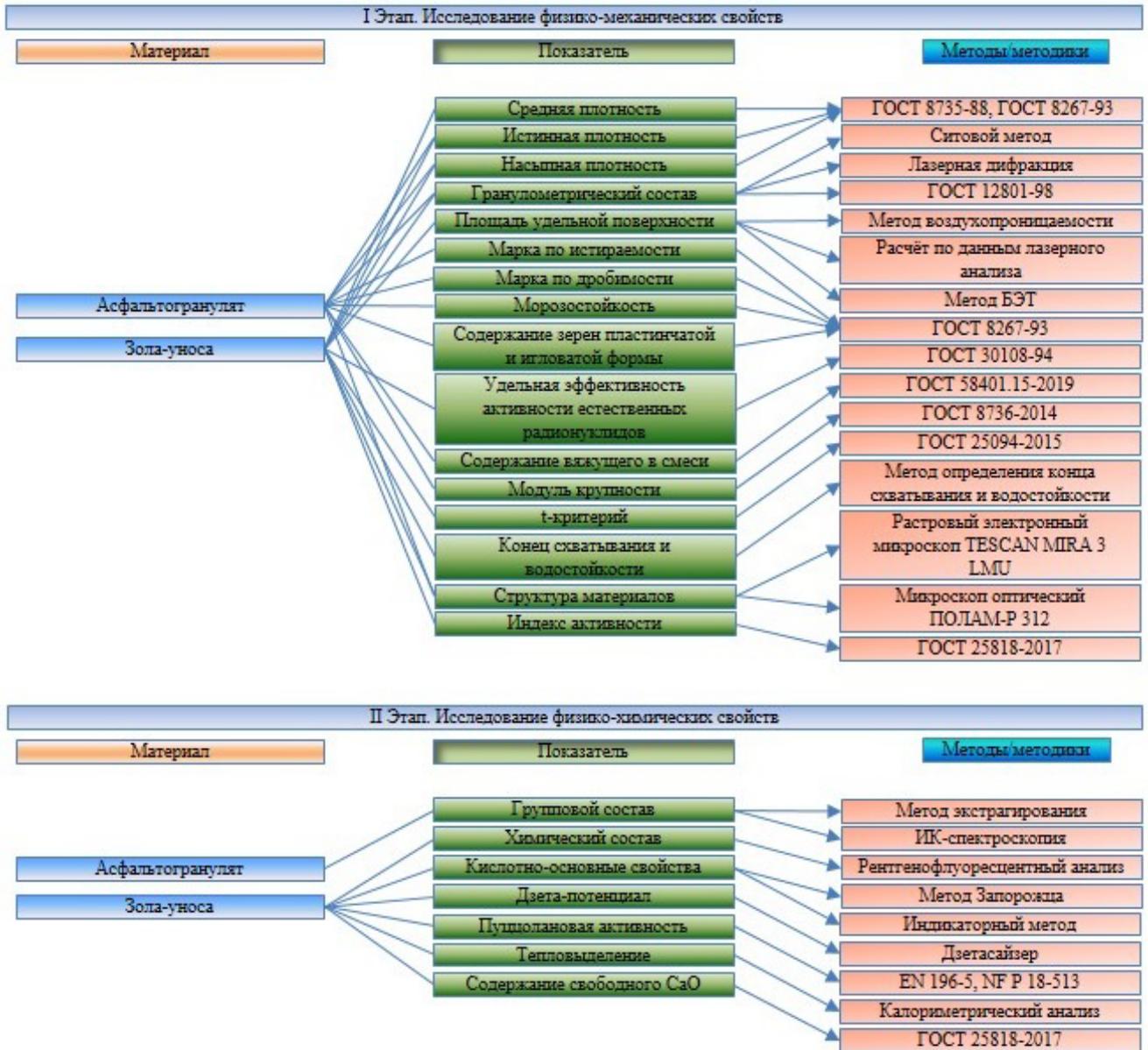
Теоретической и методологической основой работы являлись результаты фундаментальных и прикладных исследований отечественных и зарубежных исследователей в области модифицированных и композиционных вяжущих на основе

цемента, органоминеральных вяжущих, дорожно-строительных материалов. Методология построена на известной роли минеральных и органических компонентов различного состава и генезиса в структурообразовании полидисперсных полиминеральных композиционных материалов. Идея базировалась на фундаментальных исследованиях по влиянию материалов различного генезиса на процессы структурообразования в результате сингенетической объемной модификации дорожных композитов на основе битумных вяжущих, а также мелкозернистого бетона на основе неорганического вяжущего гидратационного типа твердения.

Особенность проектирования композиционных материалов строительного назначения заключается в оптимизации состава исходя из полидисперсности, полиминеральности и полиструктурности как сырьевых компонентов, так и синтезируемых материалов с целью достижения заданных свойств последних. В этой связи при подборе составных компонентов для создания консолидированной матрицы композиционного материала с минимальной степенью дефектности руководствовались ключевыми положениями физико-химической механики и основополагающими законами и теориями строительного материаловедения: общей теории структурообразования и формирования свойств строительных материалов; закона створа и закона конгруэнции (И.А. Рыбьев); полиструктурной теории композиционных материалов (В.И. Соломатов); закона сродства структур (В.С. Лесовик).

В виду того, что корректный подбор и подробное описание дизайна исследования являются ключевыми факторами, позволяющими обеспечить достоверность и воспроизводимость полученных в рамках исследования результатов, а также с целью систематизации исследования и возможности прогнозирования конечных свойств конструктивных слоев автомобильных дорог, получаемых с использованием техногенного и вторичного сырья, разработан дизайн эксперимента. Все исследования основаны на пошаговом сопоставлении характеристик с учетом сегмента исследования и включали следующие этапы: оценка свойств исходных материалов; оценка свойств органоминеральных композитов, содержащих в составе асфальтогранулят (АГ); разработка конструкций автомобильных дорог с их использованием; оценка конкурентоспособности предлагаемых решений.

*Этап I–II. Исследование физико-механических, физико-химических, свойств асфальтогранулята и зол-уноса (рисунок 3.1).*



**Рисунок 3.1** – Декомпозиционная модель проведения исследований техногенного и вторичного сырья

В рамках данного этапа исследования был изучен комплекс физико-механических и физико-химических свойств асфальтогранулята (на основании ГОСТ Р 55052–2012, а также ОДМ 218.6.1.005–2021) для дальнейшего установления заданных свойств, которыми должен обладать органоминеральный композит. Первоначально для асфальтогранулята определялся зерновой состав по ГОСТ 12801–98 и

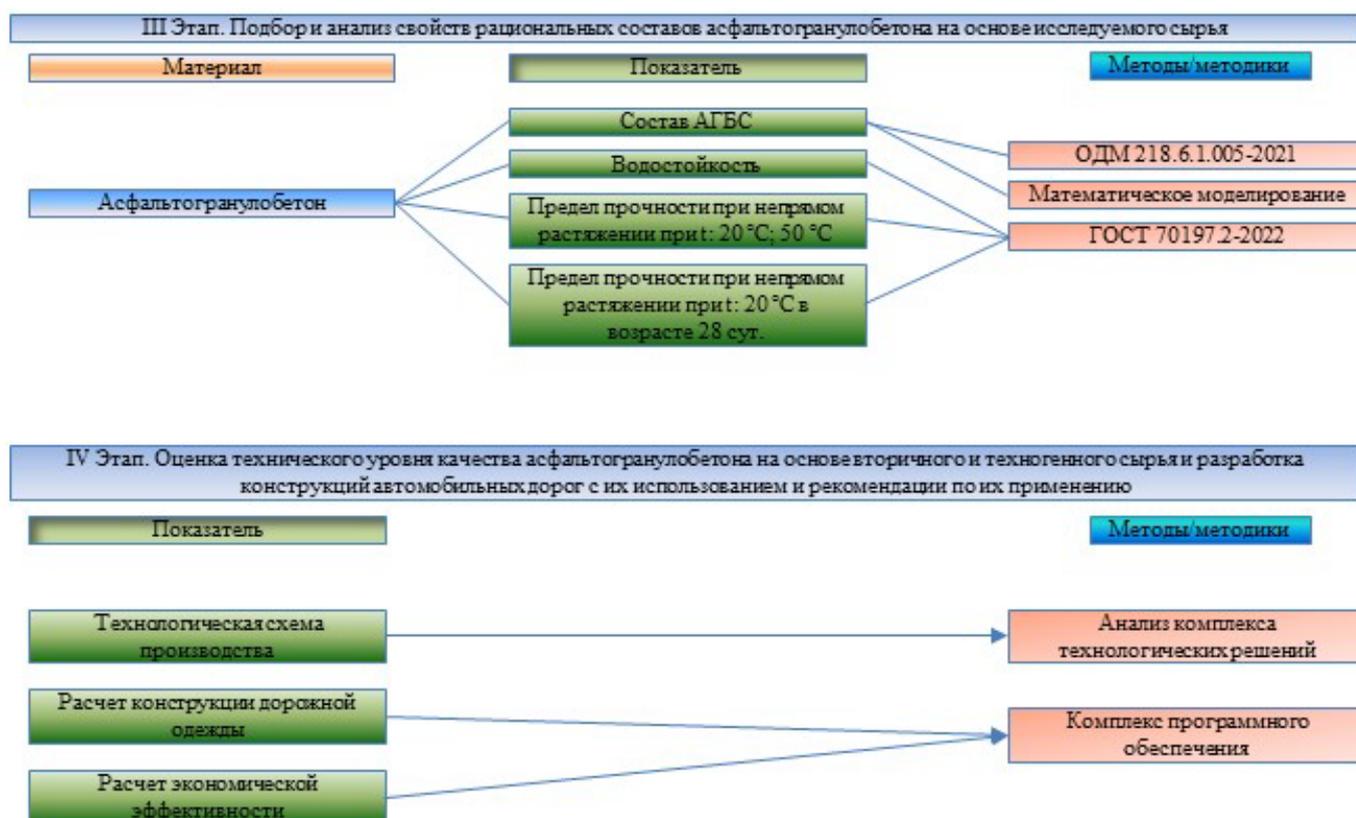
содержание битумного вяжущего по ГОСТ 58401.15–2019. В соответствии с ГОСТ 8736–2014 производился анализ свойств минеральной части асфальтобетона по следующим показателям: модуль крупности, остаток на сите № 063, истинная плотность, содержание естественных радионуклидов. Для мелких фракций минеральной части АГ в соответствии с ГОСТ 8267–93 определялись следующие параметры: полные остатки на ситах, содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, марка по дробимости щебня и гравия, марка по истираемости, морозостойкость, содержание естественных радионуклидов. Для подбора рациональных составов композитов ключевым параметром являлась степень старения битума, характеризующаяся его групповым составом после экстрагирования (количественный метод), а также качественным сравнением результатов ИК-спектроскопии.

Учитывая, что в работе применялись ранее изученные золы-уноса различного состава (Троицкой ГРЭС (1), Рефтинской ГРЭС и Назаровской ТЭС) и новые пробы зол-уноса Троицкой ГРЭС (2) и Кемеровской ГРЭС (см. главу 2.2.2), то на данном этапе производились мероприятия, по сравнительной оценке, совокупности их свойств с использованием различных методов исследования.

Активность зол-уноса как минеральных добавок для цементных систем определялась по показателям, определяемым различными способами с использованием нормируемых и научно признанных методик: индекс активности (ГОСТ 25818–2017); t-критерий (ГОСТ 25094–2015); конец схватывания и водостойкость; содержание активных центров (индикаторный метод) [141]; количество поглощенного СаО (метод Запорожца) [142]; содержание СаО<sub>св</sub> (ускоренный метод ГОСТ 25818–2017); концентрация СаО<sup>2+</sup> и ОН<sup>-</sup> (метод Фраттини EN 196–5); количество поглощённого Са(ОН)<sub>2</sub> при изотермическом нагреве (метод Чапеля NF P 18–513); тепловыделение при твердении вяжущего (калориметрический анализ).

С целью установления равномерности покрытия минеральной части битумом была изучена структура проб асфальтогранулята с помощью оптического микроскопа.

***Этап III. Подбор и анализ свойств рациональных составов асфальтогранулобетона на основе исследуемого сырья (рисунок 3.2).***



**Рисунок 3.2** – Декомпозиционная модель разработки состава асфальтогранулобетона с применением асфальтогранулята

Ключевой задачей III этапа являлся подбор рациональных составов асфальтогранулобетона для устройства слоёв покрытий и оснований. Расчет составов и установление влияния факторов варьирования на конечные свойства органоминеральных композитов осуществляли методом математического планирования эксперимента.

Для установления эффективности применения АГ в составе асфальтогранулобетона был определен комплекс физико-механических свойств. Оценка влияния применения АГ в составах асфальтогранулобетона на комплекс его физико-механических свойств производилась по методикам в соответствии с нормативной документацией (ГОСТ Р 70197.2–2022, ОДМ 218.6.1.005–2021).

Этап IV. Оценка технического уровня качества асфальтогранулобетона на основе вторичного и техногенного сырья, а также разработка конструкций автомобильных дорог с их использованием и рекомендаций по применению.

Заключительным этапом диссертационного исследования является оценка

экономической эффективности производства композитов и общей сметной стоимости строительства дорожных одежд с применением предлагаемых технологических решений.

Таким образом, на основании опыта применения техногенного и вторичного сырья в составе различных композиционных материалов, с учетом нормативных документов, регламентирующих требования к исследуемым в работе видам сырья и конечным материалам, а также научно признанных методик разработан дизайн эксперимента, основой которого является анализ характеристик исходных сырьевых материалов и органоминеральных композитов – асфальтогранулобетонов на их основе, который включает: исследование физико-механических и физико-химических свойств асфальтогранулята и зол-уноса; подбор рациональных составов и анализ свойств составов асфальтогранулобетона на основе исследуемого сырья; оценка технического уровня качества АГБ на основе вторичного и техногенного сырья; разработка конструкций автомобильных дорог с их использованием и рекомендаций по применению.

### **3.2 Исследование свойств асфальтобетонного гранулята**

#### **как компонента органоминеральных дорожно-строительных композитов**

Учитывая разнообразие рецептурно-технологических подходов переработки изношенных слоев асфальтобетона, для установления рационального подхода в каждом конкретном случае (в частности, в зависимости от срока эксплуатации (см. таблицу 2.1 в гл. 2.2.1)) произведена комплексная оценка проб асфальтобетонного гранулята [143]. В первую очередь определялись зерновой состав минеральной части проб асфальтогранулята и массовая доля органического вяжущего методом выжигания вяжущего (таблица 3.1).

На основании полученных данных (таблица 3.1) установлено, что в зависимости от срока эксплуатации покрытий из асфальтобетона по мере его увеличения изменяется зерновой состав материала. Все рассмотренные пробы характеризуются различным содержанием зерен крупнее 5 мм, их содержание колеблется в среднем

от 30 до 50 %. При этом для дальнейшего применения в составах асфальтогранулобетона необходимо содержание зерен более 5 мм не менее 45 %. Таким образом, при повторном использовании проб гранулята № 2 и 4 может потребоваться корректировка состава, заключающаяся в определении необходимого количества заполнителя.

**Таблица 3.1** – Состав проб асфальтогранулята

№ п/п	Остаток на сите	Размер отверстий сит, мм										Содержание битума, %
		15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	<0,071	
		Остаток на сите, %										
1	<i>a</i>	16,18	14	28,74	10,17	4,81	1,74	3,15	3,68	2,62	0,81	7,13
	<i>A</i>	16,18	30,18	58,74	68,91	73,72	75,46	78,61	82,29	90,91	91,72	
2	<i>a</i>	14,97	12,58	19,67	12,54	7,39	2,01	3,02	2,98	2,16	0,56	6,01
	<i>A</i>	14,97	27,55	47,22	59,76	67,15	69,16	72,18	75,16	77,32	77,88	
3	<i>a</i>	15,89	13,26	30,54	11,27	5,89	2,05	2,99	3,01	1,73	0,65	6,89
	<i>A</i>	15,89	29,15	30,54	70,96	76,85	78,9	81,89	84,9	86,63	87,28	
4	<i>a</i>	16,73	15,41	26,67	9,68	4,39	1,01	2,17	3,14	1,87	0,24	6,17
	<i>A</i>	16,73	32,14	58,81	68,49	72,88	73,89	76,06	79,2	81,07	81,31	

*Примечание: a – частный остаток на сите;*

*A – полный остаток на сите.*

Количество вяжущего в составе проб асфальтогранулята варьируется от 6 до 8 % (таблица 3.1), что входит в нормируемые пределы для рассматриваемых асфальтобетонов. Однако, при корректировке зернового состава, подразумевающего введение минеральных материалов, с учетом необходимости достижения заданных свойств асфальтогранулобетона и степени старения вяжущего в составе АГ требуется дополнительное использование органического и/или неорганического вяжущего.

При определении свойств минеральной части асфальтогранулята (таблица 3.2, 3.3) установлено, что у всех проб асфальтобетонного гранулята свойства всех минеральных компонентов соответствуют нормативным требованиям, что свидетельствует о возможности эффективной замены крупного заполнителя в составе вновь получаемых композитов на АГ.

**Таблица 3.2** – Свойства минеральной части асфальтобетонного гранулята (по ГОСТ 8736–2014)

№ п/п	Наименование показателя	Допустимые пределы	Номер пробы*			
			1	2	3	4
1	Модуль крупности	Св. 2,0 до 2,5	2,2	2,3	2,1	2,0
2	Остаток на сите № 063, % масс.	Св. 30 до 45	44	32	41	39
3	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	–	2,02	2,17	1,99	2,16
4	Содержание естественных радионуклидов, Бк/кг	Св. 370 до 740 Св. 740 до 1500	70	64	73	67

\* Нумерация проб АГ согласно таблице 2.1 главы 2.2.1

**Таблица 3.3** – Свойства минеральной части асфальтобетонного гранулята (по ГОСТ 8267–93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ)

№ п/п	Наименование показателя		Допустимые пределы	Номер пробы*			
				1	2	3	4
1	Полные остатки на ситах, % по массе	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
2	Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % по массе		св. 15 до 25	11,9	13,5	14,1	12,5
3	Марка по дробимости щебня из		600–1400	1200	800	1200	1000

№ п/п	Наименование показателя	Допустимые пределы	Номер пробы*			
			1	2	3	4
	гравия и гравия					
4	Марка по истираемости	И1–И4	И1	И3	И1	И2
5	Морозостойкость	F15–F400	F300	F150	F300	F200
6	Содержание естественных радионуклидов, Бк/кг	св. 370 до 740 св. 740 до 1500	82	76	64	79

\* Нумерация проб АГ согласно таблице 2.1 главы 2.2.1

В части исследования вяжущего, степени его старения уделяют особое внимание, так как состаренный битум плохо сопротивляется нагрузкам и погодно-климатическим факторам. Анализ степени старения вяжущего в составе проб рассматриваемого вторичного сырья в виде асфальтобетонного гранулята производился с использованием метода отмывки битума и экстрагирования (для разделения битума на фракции и определения их количественного содержания, таблица 3.4), а также с применением ИК-спектроскопии (рисунок 3.3).

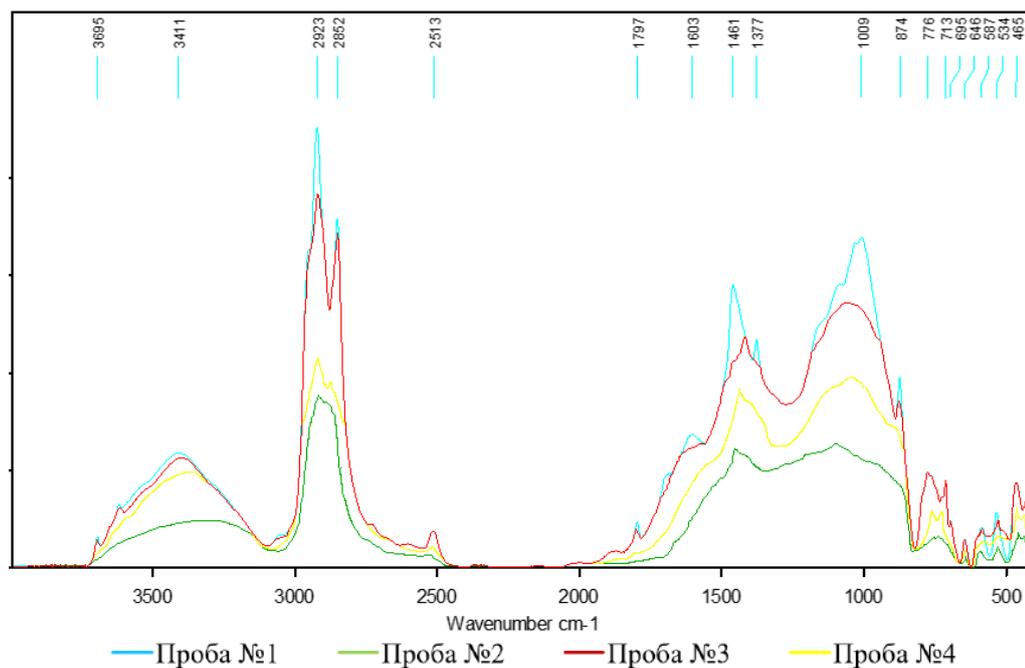
**Таблица 3.4** – Групповой состав битума после экстрагирования

№ п/п	Наименование компонентов	Содержание в пробе*, %			
		1	2	3	4
1	Карбоиды и карбены	–	0,6	0,1	0,3
2	Асфальтены	25,6	41,1	29,2	36,3
3	Углеводороды:				
	– насыщенные	28,7	16,1	29,6	22,1
	– ароматические	21,6	9,8	14,3	11,4
4	Смолы	20,3	32,4	26,8	29,9

\* Нумерация проб АГ согласно таблице 2.1 главы 2.2.1

Комплексное применение указанных методик позволило качественно и количественно определить групповой состав органического вяжущего в результате воз-

действия комплекса различных факторов в процессе эксплуатации. Так, наименьшее суммарное количество наиболее значимых легколетучих фракций (ароматические углеводороды), способствующих релаксации битума после приложения нагрузок в широком температурном диапазоне, отмечается у образцов проб асфальтогранулята № 2 и 4 (9,8 и 11,4 %, соответственно, рисунок 3.3), срок службы которых составлял 12 и 10 лет соответственно.



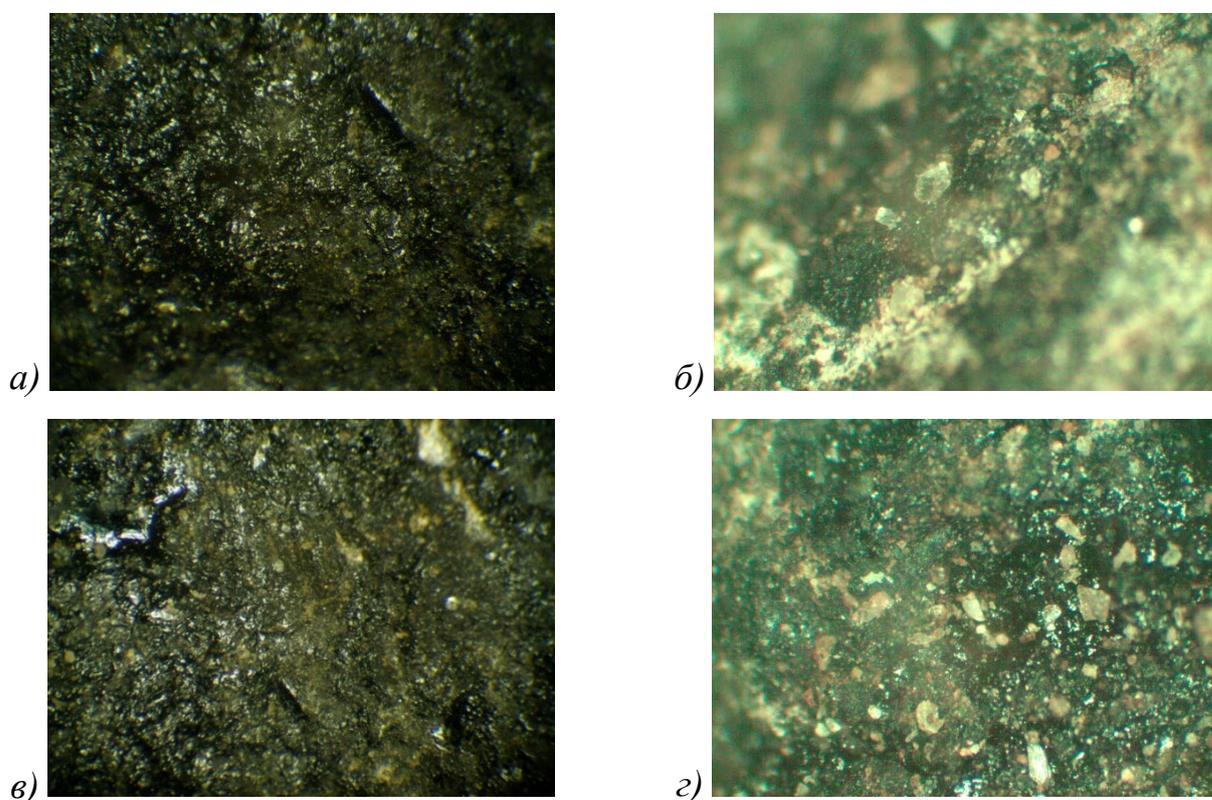
**Рисунок 3.3** – ИК-спектры проб асфальтогранулята

Это подтверждается ИК-спектроскопическим анализом органической части проб асфальтобетонного гранулята и характеризуется снижением пиков в диапазоне волновых чисел  $1300\text{--}1700\text{ см}^{-1}$  и  $700\text{--}1000\text{ см}^{-1}$  (см. рисунок 3.3).

В виду того, что битум в составе проб № 2 и 4 будет существенно слабее сопротивляться воздействию нагрузок, низкое количество вводимой эмульсии не сможет в полной мере компенсировать свойства вяжущего, указанные пробы АГ в составе асфальтогранулобетона целесообразно применять в сочетании с цементом. Это позволит консолидировать компоненты асфальтогранулобетона и обеспечит достижение заданных свойств.

В результате визуальной оценки структуры асфальтобетонного гранулята установлено, что зерна минеральной части проб № 1 и 3 равномерно и практически

полностью покрыты битумом (рисунок 3.4, *а, в*). Это свидетельствует о достаточном содержании вяжущего и так и его способности коагулирую при изменении температуры создавать равномерную пленку. В составе проб № 3 и 4 отмечаются минеральные частицы и поверхность минеральных материалов не покрытые вяжущим (рисунок 3.4, *б, г*). В данном случае вяжущее в результате процесса старения приобрело «зернистую» структуру и, несмотря на достаточное содержание вяжущего (таблица 3.1), в результате коагуляции при изменении температур в процессе эксплуатации не способно выполнять полноценно структурообразующую роль в виду того создаются локальные контакты вяжущего с минеральными компонентами.



**Рисунок 3.4** – Структурные особенности проб асфальтобетонного гранулята:

*а* – проба №1; *б* – проба №2; *в* – проба №3; *г* – проба №4

На основании совокупности проанализированных свойств асфальтобетонного гранулята пробы проранжированы в следующей последовательности снижения качества: проба № 1 → проба № 3 → проба № 4 → проба № 2.

Анализ совокупности полученных результатов показал, что с увеличением

срока эксплуатации асфальтобетона качество вторичного сырья в виде асфальтобетонного гранулята, выраженное его компонентным составом, существенно снижается, что ведет к корректировке зернового состава, а также необходимости введения основных структурообразующих компонентов – вяжущих. Причем, чем ниже содержание ароматических углеводородов в битуме, тем выше вероятность необходимости введения цемента, а чем выше их содержание – тем вероятнее применение эмульсии. Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые пробы асфальтобетонного гранулята можно использовать по наиболее экономичной технологии холодной регенерации с учетом введения необходимого количества минеральной части при этом возможно применение как битумной эмульсии, так и цемента. В первом случае будет достигаться бóльший экономический эффект за счет сниженного расхода вяжущего, но при проектировании следует учитывать получение материала нежесткого типа. Применение же цементного вяжущего с введением дополнительных минеральных компонентов более дорогостоящий вариант. Однако, конечный материал в данном случае будет полужесткого типа, обладающий более высокими прочностными показателями и потенциалом функционального применения в различных конструктивных слоях дорожных одежд. Пробы № 2 и 4 возможно также применять в качестве техногенного грунта для отсыпки временных проездов или для устройства оснований автомобильных дорог (необходимость укрепления определяется исходя из требований к проектируемой конструкции в зависимости от категории дороги). Проведенный анализ свойств асфальтобетонного гранулята позволил произвести комплексную оценку с позиции его повторного использования и необходимости введения дополнительных компонентов, в частности введения конкретных видов вяжущих.

### **3.3 Изучение свойств зол-уноса различного состава как компонентов асфальтогранулобетона**

Непостоянство и большой разброс в значениях комплекса свойств техногенного сырья в виде зол-уноса в рамках одного предприятия при переходе от партии

к партии является общеизвестным фактом [144–146] и серьезным препятствием к широкомасштабному использованию в строительной отрасли для получения продукции на постоянной основе. Одним из путей решения обозначенной проблемы является проведение комплексных системных исследований с применением многообразия нормируемых и научно признанных методик, что даст возможность создания условной унифицированной шкалы для установления возможности и эффективности применения в каждом конкретном случае, а также выявления наиболее информативных достаточных характеристик и методик их определения.

Для установления тех или иных зависимостей и закономерностей необходим массив данных. В этой связи, для расширения спектра зол-уноса в рамках данной работы количество зол уноса было расширено за счет нового вида зол: основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) (Челябинская обл.), получаемых при сжигании каменного угля марки «Г» Кузнецкого месторождения, и кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС (Кемеровская обл.), получаемой при сжигании каменного угля марки «Д» Кузнецкого месторождения (см. главу 2.2.2).

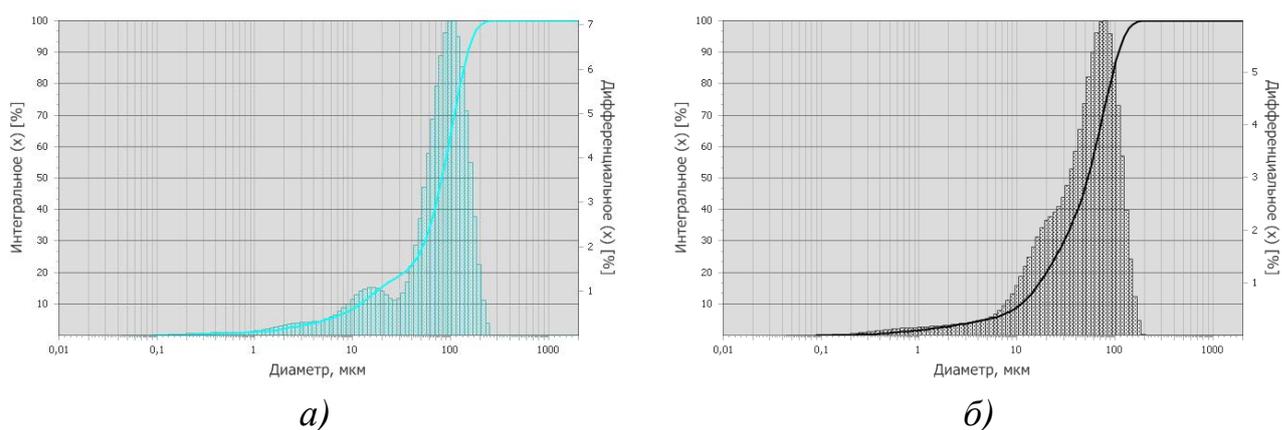
В виду специфики свойств составов асфальтогранулобетона, получаемых в рамках диссертационного исследования, анализ комплекса свойств зол-уноса производился с учетом особенностей основных структурообразующих компонентов – вяжущих веществ, отличающихся механизмом твердения (битумная эмульсия/цемент), применяемых для их получения.

***Общая характеристика зол-уноса на основании данных научно-обоснованных методик и оборудования.*** Так как, при использовании зол-уноса одним из главных вопросов является их безопасность для человека и окружающей среды определение эффективной удельной активности природных радионуклидов представляет собой первоочередную задачу и позволяет установить потенциальную возможность применения в строительстве. Для проб зол-уноса Троицкой ГРЭС (2) и Кемеровской ГРЭС этот показатель не превышает допустимые значения по ГОСТ (таблица 3.5), следовательно, они могут быть использованы в дорожном строительстве в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, строительстве производственных сооружений.

**Таблица 3.5** – Содержание естественных радионуклидов в золах-уноса (по ГОСТ 30108–94)

Источник получения ЗУ	Норма по ГОСТ, Бк/кг	Содержание естественных радионуклидов, Бк/кг
Троицкая ГРЭС (2)	< 740	381±23
Кемеровская ГРЭС		85±7

На основании проведенных ранее исследований и выводов об информативности применяемых методик и полученных данных [130–132] установлено, что дисперсность (рисунок 3.5, таблица 3.6), химический состав (таблица 3.7) и кислотно-основные свойства (таблица 3.8) являются ключевыми факторами, свидетельствующими о целесообразности применения зол-уноса как в составе органических, так и в составе неорганических вяжущих.



**Рисунок 3.5** – Распределение частиц зол-уноса по размерам

по данным лазерной дифракции: *а* – Троицкой ГРЭС (2); *б* – Кемеровской ГРЭС

**Таблица 3.6** – Данные метода БЭТ с использованием прибора Сорби М

Наименование показателя	Источник получения ЗУ	
	Троицкая ГРЭС (2)	Кемеровская ГРЭС
Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /кг	10632	2372
Общий объем пор, см <sup>3</sup> /кг	0,00943	0,00175
Средний диаметр пор, нм	3,55	2,95

Для рассматриваемых проб зол-уноса распределение частиц по размерам имеет некоторые отличия (рисунок 3.5). Интегральная и дифференциальная кривые пробы золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) характеризуются двумя пиками в области 10–25 мкм и 80–120 мкм, тогда как проба золы-уноса Кемеровской ГРЭС характеризуется одним пиком в области 60–100 мкм. Таким образом, зола-уноса Кемеровской ГРЭС является более дисперсным материалом.

Учитывая, что дисперсность – это величина, характеризующая не только размер частиц, но и количество их содержания в единице веса или объема, в работе применялся метод БЭТ, позволяющий определить площадь удельной поверхности (таблица 3.6) с учетом морфологии поверхности частиц, а также учитывающий внутреннюю и внешнюю пористость минерального материала для установления влияния сорбционных процессов на характер взаимодействия с вяжущими.

Несмотря на то, что основной пик по данным лазерной дифракции для пробы золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) смещен в сторону больших размеров ее удельная площадь поверхности в 4,5 раза больше, чем пробы золы-уноса Кемеровской ГРЭС (таблица 3.6). Это объясняется увеличенным более чем в 5 раз общим объемом пор пробы золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) по сравнению с пробой золы-уноса Кемеровской ГРЭС, при этом средний диаметр пор отличается менее чем на 1 нм (0,6 нм).

При определении химического состава по данным рентгенофлуоресцентного анализа (таблица 3.7) установлено, что в виду высокого содержания оксида кальция золу-уноса Троицкой ГРЭС (2) ( $\text{CaO} - 16,74\%$ ) следует относить к типу высококальциевых, а золу-уноса Кемеровской ГРЭС ( $\text{CaO} - 5,09\%$ ) – к типу низкокальциевых. Так же отмечаются существенные колебания в содержании оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Обращает на себя внимание тот факт, что суммарное содержание указанных оксидов сопоставимо с суммарным содержанием общего количества центров адсорбции (таблица 3.8). Однако, количественное распределение центров адсорбции между кислотами и основаниями Льюиса и Бренстеда позволяют раскрыть характер взаимодействия с различными видами вяжущих.

**Таблица 3.7** – Химический состав проб зол-уноса по данным рентгенофлуоресцентного анализа

Источник получения ЗУ	Содержание, %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	пр.	п.п.п.*
Троицкая ГРЭС (2)	40,31	25,40	16,74	8,20	1,11	3,28	0,58	1,71	2,67	16,74
Кемеровская ГРЭС	59,60	23,68	5,09	3,81	0,18	2,25	1,29	2,24	1,86	2,05

\*п.п.п. (потери при прокаливании) определяли ускоренным методом по ГОСТ 55661–2013

**Таблица 3.8** – Кислотно-основные свойства зол-уноса по данным индикаторного метода

Источник получения ЗУ	Количество центров адсорбции, 10 <sup>3</sup> мг-экв/г			
	Основания по Льюису –4,4...0	Кислоты по Бренстеду 0...7	Основания по Бренстеду 7...13	Общее количество
	Троицкая ГРЭС (2)	8,645	22,671	
Кемеровская ГРЭС	4,340	6,097	74,921	85,358

Взаимосвязь между донорно-акцепторными центрами поверхности компонентов бетона, в частности наполнителей цемента, выступающих в роли трудно-растворимых добавок, с основными свойствами бетонной смеси и бетонного камня была изучена Шангиной Н.Н. [148]. В результате исследований было установлено, что бренстедовские кислотные центры (рКа от 0 до 7) ответственны за гидратационную активность цементной системы. В связи с этим при изучении зол-уноса как активного минерального компонента цементной системы нами был выбран именно этот диапазон. Учитывая, что основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) характеризуется более высоким количеством центров адсорбции, относящихся к кислотам по Бренстеду (в 3,7 раза) по сравнению с золой-уноса Кемеровской ГРЭС, можно

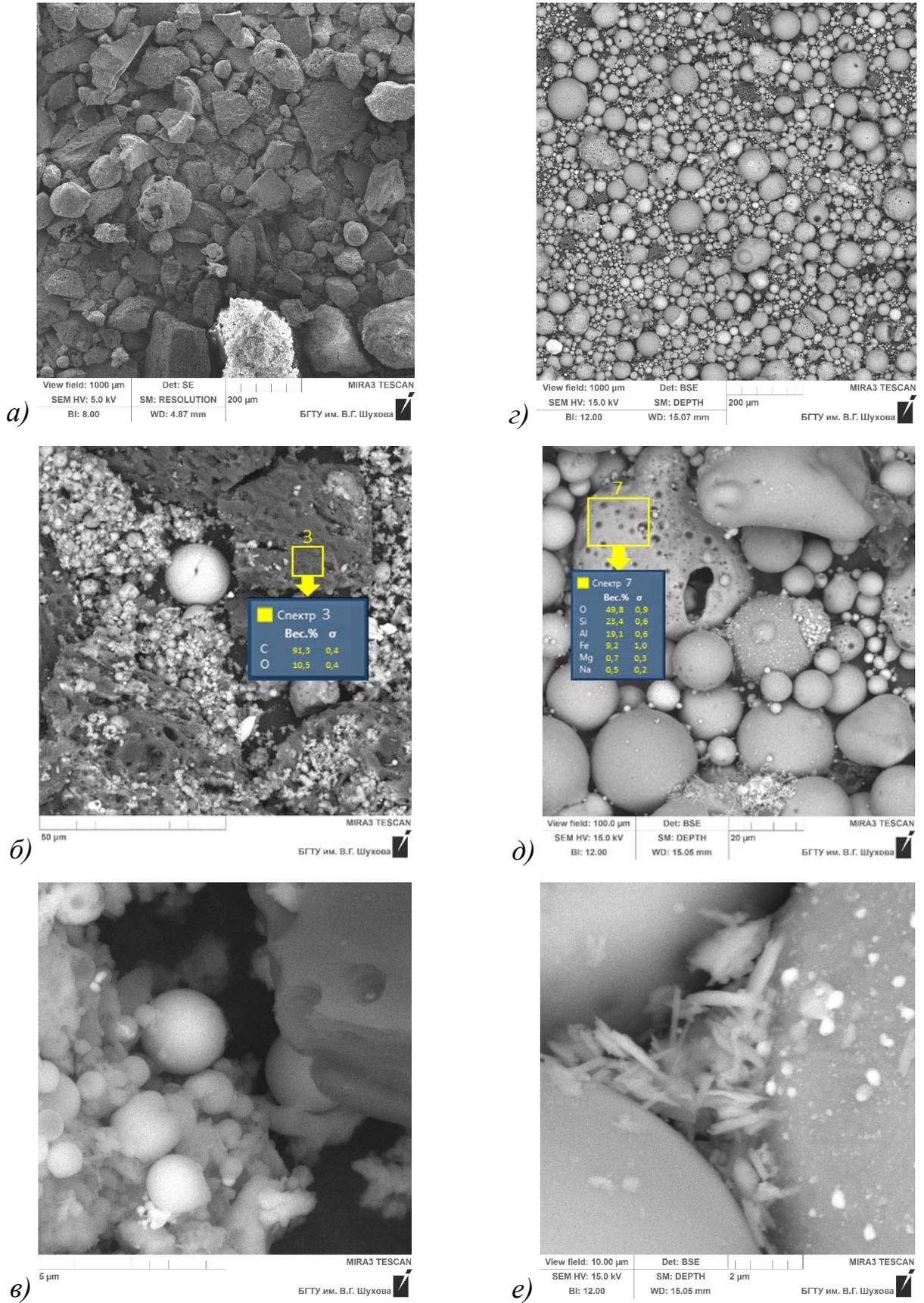
предположить, что она будет оказывать наибольшее влияние на процесс гидратации цемента.

В комплексе исследований с использованием научно-признанных методик и оборудования особое значение имеет изучение морфоструктурных особенностей сырьевых компонентов с использованием растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным спектральным анализом (рисунок 3.6). Это позволяет установить взаимосвязь с проанализированными свойствами и оценить общий вклад размерной гетерогенности и строения частиц, а также их элементного состава в процессы структурообразования матрицы сложносоставных органоминеральных композиционных материалов, содержащих различные виды вяжущих.

Увеличение  $200\times$  показало абсолютное различие в строении частиц золы-уноса. Частицы основной золы-уноса при данном увеличении характеризуются практически отсутствием частиц сферической формы, где минеральный материал преимущественно представлен частицами угловатой и кубовидной формы размером в диапазоне от 100 до 200 мкм, тогда как кислая зола-уноса Кемеровской ГРЭС представлена практически идеальными микросферами размером от нескольких микрон до 100 мкм, которые единично покрыты порами.

При бóльшем увеличении (рисунок 3.6 б, д) –  $50000\times$  для золы-уноса Троицкой ГРЭС и  $20000\times$  для золы-уноса Кемеровской ГРЭС – с использованием энергодисперсионного спектрального анализа частиц отличных от микросфер установлены ключевые особенности рассматриваемых проб техногенного сырья от сжигания различных видов угля.

Сферические частицы основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) (рисунок 3.6 б) характеризуются размерами от  $<1$  мкм до 10 мкм и хаотично распределены в ячейках частиц угловатой и кубовидной формы размером  $>50$  мкм, элементный состав которых свидетельствует о том, что это остатки недогоревшего топлива. Это объясняет данные лазерной дифракции (наличие двух ключевых пиков в разных диапазонах размеров частиц, т.е. прерывистый гранулометрический состав, рисунок 3.5), результаты полученные по методу БЭТ (высокая удельная площадь поверхности, общий объем пор и их средний размер, таблица 3.6), а также данные о химическом составе (в частности потери при прокаливании – 16,74 %, таблица 3.7).



**Рисунок 3.6 – Морфоструктурные особенности зол-уноса:**

*а, б, в* – Троицкой ГРЭС (2); *г, д, е* – Кемеровской ГРЭС

В свою очередь проба кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС (рисунок 3.6, д) напротив характеризуется непрерывным гранулометрическим составом, где единично диагностируемые пористые частицы окатанной отличной от сфер формы имеют схожий с микросферами состав, что подтверждают данные лазерной дифракции – отсутствие характерных пиков (рисунок 3.5), результаты по методу БЭТ (существенно более низкие значения удельной площади поверхности, общего объема пор и их среднего размера, таблица 3.6), а также данные о химическом составе (таблица 3.7).

Наибольшее увеличение  $500000\times$  и  $200000\times$  для Троицкой ГРЭС (2) и Кемеровской ГРЭС соответственно (рисунок 3.6 в, е), позволило выявить наличие в составе первой наноразмерных сферических частиц, а в составе второй – наличие небольшого по отношению к общей пробе материала кристаллических частиц игловатой формы.

Таким образом, на основании совокупности проанализированных данных можно предположить, что ввиду дисперсности, химического состава, донорно-акцепторных свойств и микроструктурных особенностей наиболее вероятно в процессах структурообразования как в сочетании с органическим (битум), так и неорганическим (цемент), наиболее активно будет проявлять себя основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2), по сравнению с кислой золой-уноса Кемеровской ГРЭС. Однако, для установления возможности применения с точки зрения нормативной документации, а также с позиции непосредственного взаимодействия с вяжущими требуются дополнительные исследования.

***Свойства зол-уноса при использовании в сочетании с органическим вяжущим.*** Несмотря на то, что в составе асфальтогранулобетона наиболее часто применяются битумную эмульсию (наряду со вспененным битумом – в виду простоты, экономичности и технологической безопасности использования) непосредственный контакт компонентов в структуре композиционного материала осуществляется через тонкие пленки битума, оставшегося после распада эмульсии. В связи с этим целесообразно рассматривать золы-уноса как минеральные порошки, используемые для асфальтобетонов, в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003 (таблица 3.9).

**Таблица 3.9** – Физико-механические свойства зол-уноса

(в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003)

Наименование показателя	Норма по ГОСТ	Источник получения ЗУ	
		Троицкая ГРЭС (2)	Кемеровская ГРЭС
Зерновой состав, (мм) % по массе:			
– <1,25	≥ 95	100	100
– <0,315	80–95	99,4	99,9
– <0,071	≥ 60	79	94,5
Пористость, %	≤ 40	43	34
Показатель битумоемкости, г/100 см <sup>3</sup>	≤ 80	84	59
Влажность, %	≤ 2,5	0,27	0,40

Учитывая, что золы-уноса представляют собой порошки из твердых и порошковых отходов промышленного производства в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003 их следует относить к марке МП-2, допустимые значения для которой представлены в столбце «Норма по ГОСТ» (таблица 3.10). Основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) по содержанию частиц мельче 0,315 мм, пористости и битумоемкости превышает допустимые ограничения. Кроме того, содержание частиц мельче 0,071 мм и значение пористости не согласуется с полученными выше данными лазерной дифракции и метода БЭТ. Это обусловлено применением в рамках нормативной документации достаточно грубых методик, не позволяющих в полной мере оценить свойства материала и установить ключевые факторы, влияющие на формирование свойств в матрице конечного материала. Кислая зола-уноса не соответствует требованиям нормативной документации лишь по содержанию частиц мельче 0,315 мм.

Рассматривая взаимосвязь между пористостью по ГОСТ и битумоемкостью общая тенденция сохраняется, т.е. чем выше пористость, тем выше битумоемкость. Однако, высокое значение битумоемкости у золы-уноса Троицкой ГРЭС (2), превышающее допустимый предел обусловлено не общей пористостью материала, а

тем, что относительно крупные поры частиц угловатой и кубовидной формы (см. рисунок 3.6, б) хаотично заполнены высокодисперсными сферами, в связи с чем происходит увеличение площади взаимодействия с условным органическим вяжущим (для проведения эксперимента используют индустриальное масло).

**Таблица 3.10** – Свойства зол-уноса как компонентов бетонов на основе цемента (в соответствии с ГОСТ 25818–2017)

Наименование показателя	Нормируемые значения	Тип золы-уноса	
		Кислая	Основная
		Кемеровская ГРЭС	Троицкая (2) ГРЭС
<b>Свойства зол-уноса в соответствии с ГОСТ 25818–2017</b>			
<b>по физико-механическим свойствам</b>			
Удельная поверхность по ПСХ, м <sup>2</sup> /кг	> 300	217	580
Остаток на сите № 008, мас. %	< 15	19,5	15
Водопотребность, %	< 95	79	68
Индекс активности на 28 сут.	≥ 75	72	76
Индекс активности на 90 сут.	≥ 85	94	84
<b>по химическому составу (нормируемые значения для кислых/основных)</b>			
Содержание СаО, мас. %	$\leq 10$ $\geq 10$	5,09	16,74
Содержание MgO, мас. %	≤ 5	2,25	3,28
Содержание сернистых и сернокислых соед. в пересчете на SO <sub>3</sub> , мас. %	≤ 3	0,18	1,11
Содержание щелочных оксидов в пересчете на Na <sub>2</sub> O, мас. %	$\leq 3$ $\leq 1,5$	1,29	0,58
Содержание хлорид-ионов, мас. %	≤ 0,1	–	–
Потеря массы при прокаливании	$\leq 5$ $\leq 2$	2,05	16,74

Таким образом, использование методик, регламентируемых нормативной документацией, позволило установить, что обе пробы зол-уноса не могут быть применены взамен минерального порошка, подразумевающего его 100 % замену. При этом, количественно ограниченное использование минеральных наполнителей в виде рассматриваемого техногенного сырья, выполняющего роль функциональной добавки, регулирующей процессы структурообразования и улучшающей свойства конечного композита, возможно, но требует определения рациональных границ варьирования. На основании значений битумоемкости обе пробы в различной степени обладают структурирующей способностью, и, чем выше битумоемкость, тем выше структурирующая способность золы-уноса. Следовательно, основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) будет проявлять больший структурирующий эффект по сравнению с кислой золой-уноса Кемеровской ГРЭС, обусловленный не только показателем битумоемкости, но и изученными выше свойствами.

***Свойства зол-уноса при использовании в сочетании с неорганическим вяжущим.*** При использовании зол-уноса в составе бетонов на основе цемента, как правило, руководствуются требованиями ГОСТ 25818–2017.

Анализ данных, представленных в таблице 3.10 показал, что исходя из требований нормативной документации ни одна из рассматриваемых проб зол-уноса не может быть использована в составе бетона на основе цемента.

Кислая зола-уноса Кемеровской ГРЭС по физико-механическим свойствам обладает сниженными по сравнению с требуемыми показателями удельной поверхности (на 27 %) и индекса активности на 28 сутки (на 4 %).

В свою очередь основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) не соответствует требованиям по ГОСТ по значениям индекса активности (ниже на 1 %) и потерь при прокаливании (выше в 9 раз).

Учитывая, что методики регламентируемые нормативной документацией строго регламентируют количество золы в составе подготавливаемых и испытываемых образцов, а отклонения от предельного значения как по индексу активности на 28 сутки для кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС, так по индексу активности на

90 сутки и для основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) снижены лишь на 1 единицу, целесообразно рассмотреть рациональные диапазоны варьирования количеством рассматриваемых зол-уноса в составе цементных систем, позволяющих обеспечить требуемые значения и запас прочности композитов с их использованием. При этом, стоит учитывать возможное негативное влияние на технологические и физико-механические свойства цементных систем значительных потерь при прокаливании у основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2).

Таким образом, комплексный анализ двух проб зол-уноса различных типов позволил установить ключевые особенности каждой пробы. Использование научно обоснованных методик с применением высокоточного оборудования позволило комплексно оценить вклад дисперсности зол-уноса, их состава и морфоструктурных особенностей на кислотно-основные свойства (или донорно акцепторную способность), определяющие характер и механизм взаимодействия зол-уноса с различными видами вяжущих. Тогда как, по результатам испытаний на основании нормативной документации каждая из проб хотя бы по одному показателю не соответствует требованиям. В этой связи целесообразен подбор оптимальных концентраций рассматриваемых проб зол-уноса различных типов (в зависимости от вида применяющегося вяжущего или комплексного использования вяжущих) с учетом необходимости обеспечения запаса прочности. Отдельное внимание следует уделить изучению характера и механизмов взаимодействия каждой пробы зол-уноса с цементом с применением различных методик (прямые/косвенные) определения их активности, позволяющих произвести комплексную оценку их влияния на протекание процессов от начала гидратации до набора марочной прочности.

### **3.4 Анализ активности зол-уноса как компонентов цементных систем**

Многолетний опыт применения различных зол-уноса как минеральных компонентов в составе строительных материалов на основе цемента показывает, что ввиду специфики состава и свойств они требуют системного методологического подхода для установления возможности и целесообразности их использования с

учетом функционального назначения в составе цементобетона. Так, в составе цементобетонов золы могут применяться как материал взамен части песка (заполнитель), взамен части цемента (активная минеральная добавка), а также как самостоятельный компонент (функциональная добавка, улучшающая удобоукладываемость, снижающая теплоту гидратации и т.д.). При этом одним из важнейших критериев, определяющих функциональное назначение рассматриваемого техногенного сырья, является активность. В целом активные минеральные добавки, согласно нормативной документации на добавки для бетонов и растворов (ГОСТ 24211–2018 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия»), принято разделять на три основные группы:

- 1) обладающие вяжущими свойствами;
- 2) обладающие пуццолановой активностью;
- 3) обладающие одновременно вяжущими свойствами и пуццолановой активностью.

Золы же как активные минеральные добавки делят на две группы – обладающие пуццолановой активностью и одновременно вяжущими свойствами и пуццолановой активностью. Это обусловлено постоянством наличия аморфизованной кремнеземной составляющей и оксида кальция в различном процентном соотношении в зависимости от вида сжигаемого угля, технологии сжигания топлива и удаления зол [149]. Кроме того, помимо классификации зол-уноса в соответствии с нормативной документацией по механизму действия исходя из состава, согласно [131, 149, 150] золы принято разделять по таким расчетным критериям как (рисунок 3.7, таблица 3.11): модуль основности ( $M_o$ ); силикатный (кремнеземистый) модуль ( $M_c$ ); коэффициент качества  $K$ ; коэффициент основности ( $K_{осн}$ ); отношение  $Al_2O_3/SO_3$ .

Согласно классификации [150] на основании расчетных критериев качества зол-уноса в зависимости от общего содержания оксида кальция (рисунок 3.7) установлено, что наряду с изученными ранее кислыми инертными золами-уноса Троицкой ГРЭС (1), Рефтинской ГРЭС и основной активной золой-уноса Назаровской

ТЭС пробы кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС и основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) являются скрыто активными. При этом, все пробы зол независимо от группы активности согласно [150] рекомендованы к использованию в области дорожного строительства.

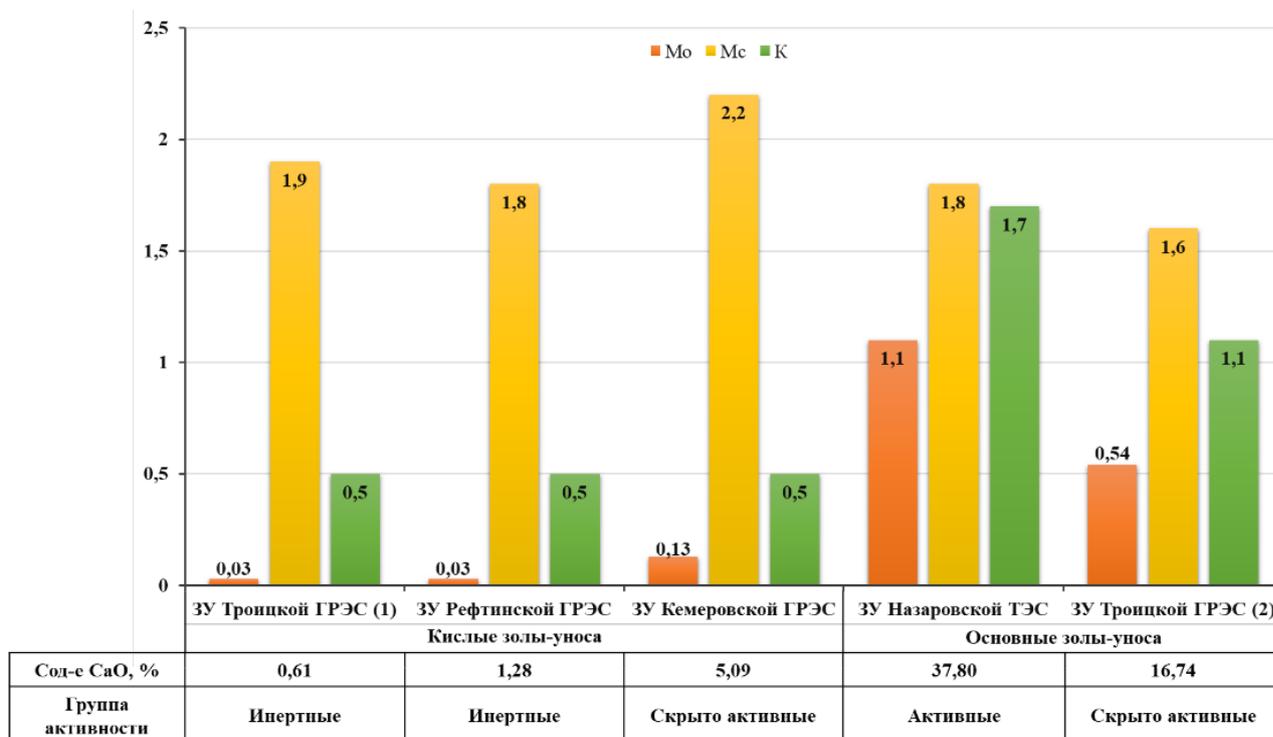


Рисунок 3.7 – Вариативность расчетных критериев качества зол-уноса

Таблица 3.11 – Значения классификационных признаков зол-уноса

Источник получения ЗУ	Троицкая ГРЭС (1)	Рефтинская ГРЭС	Кемеровская ГРЭС	Назаровская ТЭС	Троицкая ГРЭС (2)
$K_{осн}$	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4
$Al_2O_3/SO_3$	106,67	160,00	102,22	1,56	17,95

На основании значений критерия основности и отношения  $Al_2O_3/SO_3$  [131, 150] (таблица 3.11) установлено, что наряду с ранее изученными кислыми золами-уноса Троицкой ГРЭС (1) и Рефтинской ГРЭС проба кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС также относится к классу алюмосиликатных. В свою очередь проба основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) несмотря на содержание оксида кальция

(СаО – 16,74 %) по коэффициенту основности и отношению  $Al_2O_3/SO_3$  в отличие от основной золы-уноса Назаровской ТЭС (относящейся к классу высококальциевых низкосульфатных) относится к классу алюмосиликатных, которые для использования в качестве эффективной добавки к цементу следует механоактивировать.

Анализ отечественных и зарубежных источников [124, 126, 141, 142, 151, 152] показывает, что существует множество различных методов определения активности минерального сырья, потенциально способного выступать в качестве активных добавок в составе цементных систем. Рассмотренные методы условно можно отнести к двум основным типам (рисунок 3.8):

- физико-химические или прямые методы;
- физико-механические или косвенные методы.

При этом, разнообразие методик позволяет отследить характер и механизм действия зол-уноса в составе цементных систем на разных стадиях гидратации:

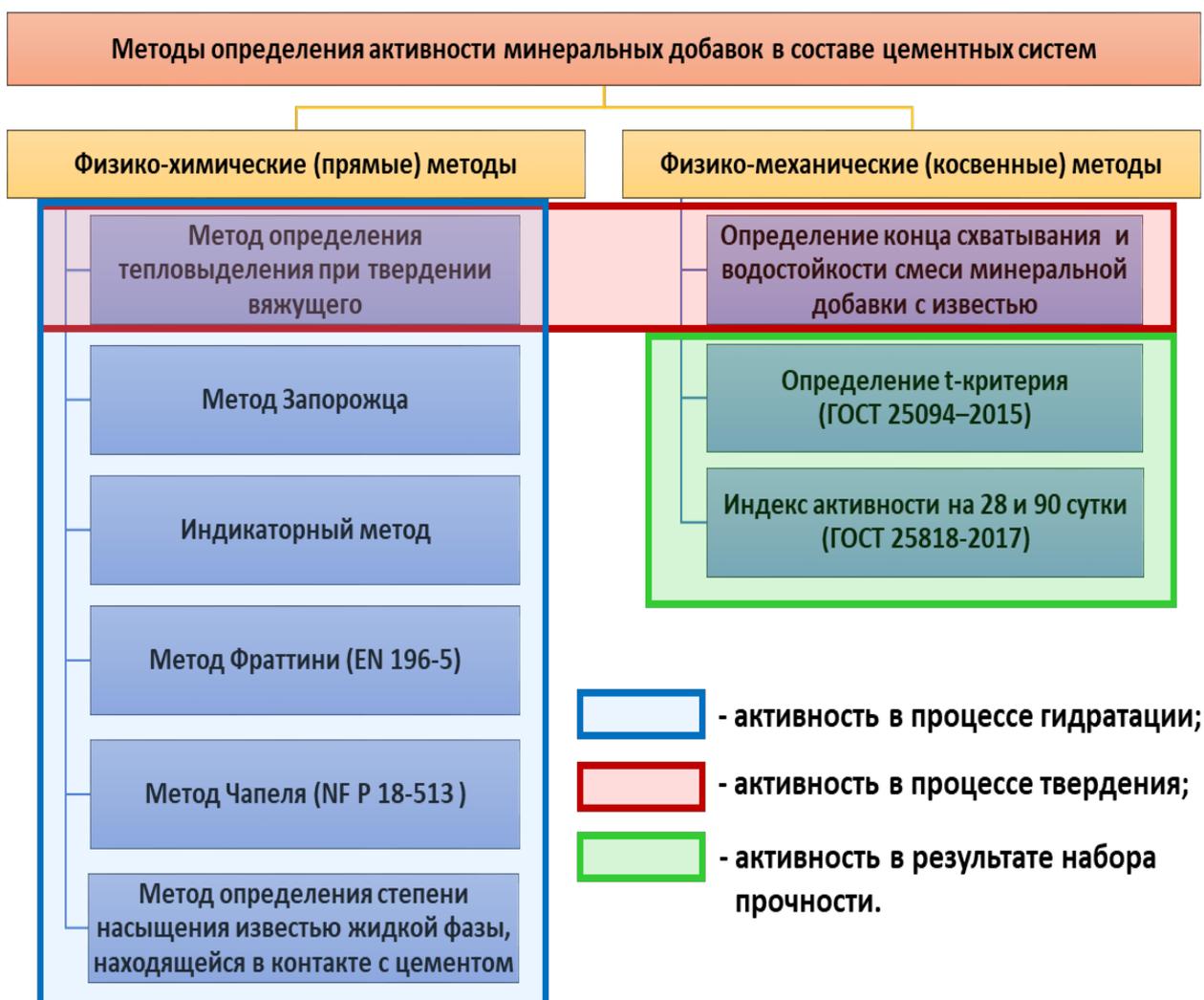
- в результате затворения водой;
- в процессе твердения;
- в результате набора марочной прочности.

В своих исследованиях научные коллективы, как правило, используют лишь один из перечисленных методов, согласно результатам которого прогнозируют влияние добавки на цементную систему. Однако зачастую те или иные методы являются необходимыми, но недостаточными для прогнозирования эффективности использования зол-уноса, выявления характера их взаимодействия с цементом и установления рецептурно-технологических особенностей использования зол в композиционных материалах на основе цемента. Для комплексной оценки активности зол-уноса в составе цементных систем проведены исследования с использованием всего перечня методик (рисунок 3.8).

Результаты **физико-химических (прямых) методов** показали следующее.

В классическом представлении [153, 154] гидратация цемента является непрерывным процессом, с течением которого происходит изменение физико-химических свойств цементного камня. Этот процесс принято разделять на четыре основные фазы:

*I фаза. Индукционный период*, когда при взаимодействии с водой происходит поверхностная реакция с образованием гидратной пленки в виде геля на поверхности цементных зерен.



**Рисунок 3.8** – Классификация методов определения активности минерального техногенного сырья как добавок для цементных систем

*II фаза. Начальное схватывание*, когда раствор теряет пластичность за счет образования кристаллических структур.

*III фаза. Ускоренное твердение*, сопровождающееся интенсивный ростом кристаллической структуры, в результате чего формируется прочная матрица.

*IV фаза. Замедленное твердение*, характеризуется медленным набором прочности.

Анализ кинетики тепловыделения при гидратации цементного теста в присутствии зол-уноса (таблица 3.12, приложение А, рисунок А.1–А.6) при температуре 27 °С длительностью измерений 3 сут. свидетельствует о весьма существенном влиянии минеральных добавок на процессы в начальные сроки структурообразования. Следует отметить, что для осуществления данного эксперимента были подготовлены составы вяжущего с использованием 15 % в случае использования кислых зол-уноса и 25 % в случае с основными золами-уноса на основании определенных ранее составов [131, 155].

**Таблица 3.12** – 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 ТЭС	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 низкокальциевых ЗУ  
 – для высококальциевых ЗУ

В отличие от вяжущего без добавки при использовании минеральных добавок в виде зол-уноса различного состава в результате затворения водой происходит торможение всплеска энергии (на 2–3 минуты), свидетельствующего о начавшейся химической реакции сопровождающейся образованием первичных гидратных связей, при этом снижается и энергия тепловыделения – на 42–55 %. Образование гидратных связей обуславливает наступление индукционного периода, с последующим переходом в фазу начального схватывания, которая вместо привычных 7–8 часов, в присутствии добавок длится 9–10 часов. После 10–11 часов гидратации с

наступлением фазы ускоренной гидратации возрастает интенсивность тепловыделения. Замедление процесса гидратации цемента в присутствии зол-уноса, сопровождающееся снижением выделившегося тепла, связано с преимущественным содержанием в добавках пуццолановой составляющей. В рамках каждого типа зол прослеживается зависимость: чем выше содержание СаО, тем выше количество выделившегося тепла.

Применение ряда методик (метод Запорожца, метод Фраттини, метод Чапеля), характеризующих преимущественно индукционный период, позволило выявить следующее (таблица 3.13, 3.14, рисунок 3.9–3.11).

**Таблица 3.13** – Данные метода Запорожца и содержание СаО<sub>св</sub>

Источник получения ЗУ	Количество поглощенного СаО (метод Запорожца)*, мг/г ( $t_{\max}=28$ ч)	Содержание СаО <sub>св</sub> , %	
		Фактические значения	Норма по ГОСТ 25818–2017
Троцкая ГРЭС (1)	 30,14 ( $t_{\max}=24$ ч)	0,013	–
Рефтинская ГРЭС	28,77 ( $t_{\max}=24$ ч)	0,075	–
Кемеровская ГРЭС	19,92 ( $t_{\max}=28$ ч)	0,97	–
Назаровская ТЭС	 21,03 ( $t_{\max}=28$ ч)	14,050	$\leq 2$
Троицкая ГРЭС (2)	34,86 ( $t_{\max}=30$ ч)	0,094	$\leq 2$

\*Повышение количества  – для низкокальцевых ЗУ

поглощенного СаО  – для высококальцевых ЗУ

По данным метода Запорожца (дублирует метод определения степени насыщения известью жидкой фазы, находящейся в контакте с цементом), отмечается корреляция между количеством поглощенного СаО и содержанием свободного оксида кальция в рамках каждого типа.

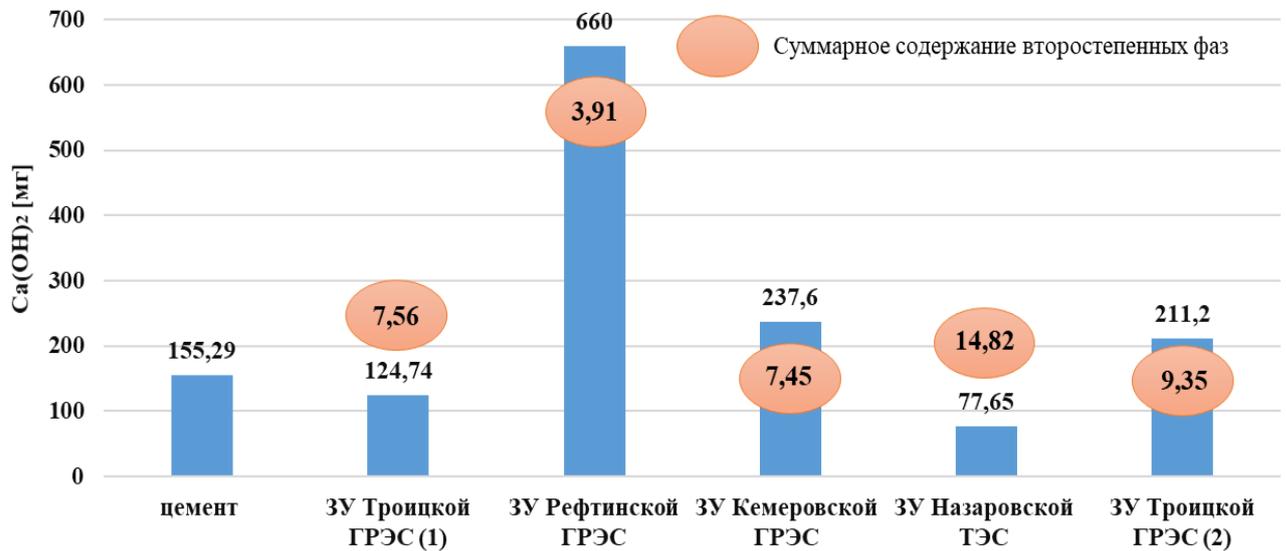
Таким образом, для кислых зол уноса, чем выше содержание СаО<sub>св</sub> определенное ускоренным методом по стандартной методике в соответствии с ГОСТ

25818–2017, тем ниже количество поглощенного СаО и тем больше времени требуется для достижения экстремума. Для основных зол зависимость по количеству поглощенного СаО сохраняется, однако несмотря на меньшее содержание СаО<sub>св</sub> время для достижения экстремальной концентрации поглощенного СаО увеличивается, что вероятно связано с высоким содержанием примесей, выраженных суммарным содержанием потерь при прокаливании и прочим.

Обращает на себя внимание, содержание СаО<sub>св</sub> в составе основной золы-уноса Назаровской ТЭС в 7 раз превышающее допустимое предельное значение по ГОСТ 25818–2017. Это обусловлено содержанием в ее составе общего количества СаО, а также наличием клинкерных минералов, что характеризует основную золу-уноса Назаровской ТЭС как высокоактивную, о чем свидетельствуют данные об уменьшении сроков схватывания в ранее проведенных исследованиях [131, 132]. При использовании ее в составе цементных систем следует строго контролировать процентное соотношение добавки в составе смесей, а также сроки схватывания и твердения смесей, так как это оказывает существенное влияние на процессы структурообразования и может привести к саморазрушению в результате избыточного роста кристаллических структур, создающего высокое внутреннее напряжение. Кроме того, при использовании данного типа золы в составе смесей в сочетании с цементом, требующих уплотнения, особое внимание следует уделять такой характеристике как начало схватывания, которое определяет временной отрезок, за который смесь необходимо доставить (если она не готовится непосредственно на участке), распределить и уплотнить.

Наряду с методом Запорожца в работе использован метод Чапеля согласно французскому стандарту NF P18–513:2010, который также основывается на измерении количества гидроксида кальция, поглощённого пуццолановой добавкой (отличительные особенности методики приведены в главе 2.1). Учитывая специфику метода, следует отметить, что применяемый в ходе эксперимента раствор сахарозы обладает способностью растворять алюминатную и ферритную фазу, оставляя силикаты и второстепенные фазы, что может существенно повысить поглощающую способность зол-уноса. Так, в результате экспериментальных

исследований установлено (рисунок 3.9), что наименьшей активностью характеризуются кислая зола-уноса Троицкой ГРЭС (1) и основная зола-уноса Назаровской ТЭС – количество поглощённого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при изотермическом нагреве в течение 16 ч в 1,2 и 2 раза ниже по сравнению с цементом.

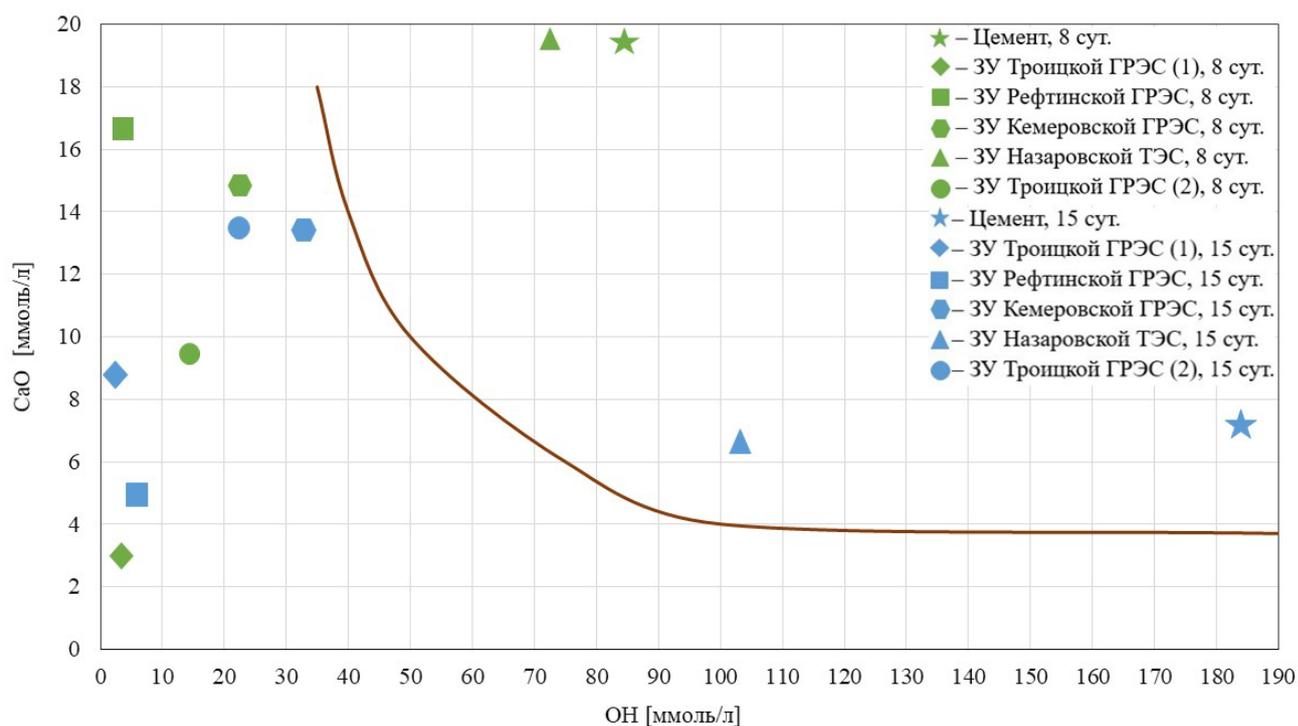


**Рисунок 3.9** – Результаты оценки пуццолановой активности зол-уноса по тесту Чапеля

Значительно выделяется кислая зола-уноса Рефтинской ГРЭС: количество поглощённого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  составило 660 мг, что в 4 раза выше по сравнению с цементом и в 8,5 раз выше по сравнению с основной золой-уноса Назаровской ТЭС. В свою очередь примерно одинаковой пуццолановой активностью характеризуются кислая зола-уноса Кемеровской ГРЭС и основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) – в 1,5 и 1,3 раза соответственно выше по сравнению с цементом (рисунок 3.9). При этом, результаты по тесту Чапеля хорошо коррелируют с содержанием второстепенных фаз в рамках каждого типа: чем выше содержание второстепенных фаз, тем ниже количество поглощенного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , характеризующее пуццолановую активность.

Согласно методу Фраттини (тест регламентированный EN 196–5:2011, рисунок 3.10) с учетом состава исследуемых зол-уноса отмечается, что пуццолановая актив-

ность на 8 и 15 сутки проявляется у всех кислых зол-уноса, а также у высококальциевой золы-уноса Троицкой ГРЭС (2). Это обусловлено высоким содержанием рентгеноаморфной фазы, состоящей преимущественно из кремнезема, в то время как зола-уноса Назаровской ТЭС с контрольной пробой вяжущего (цементом) находятся выше кривой растворимости, что свидетельствует о практическом отсутствии их пуццолановой активности.



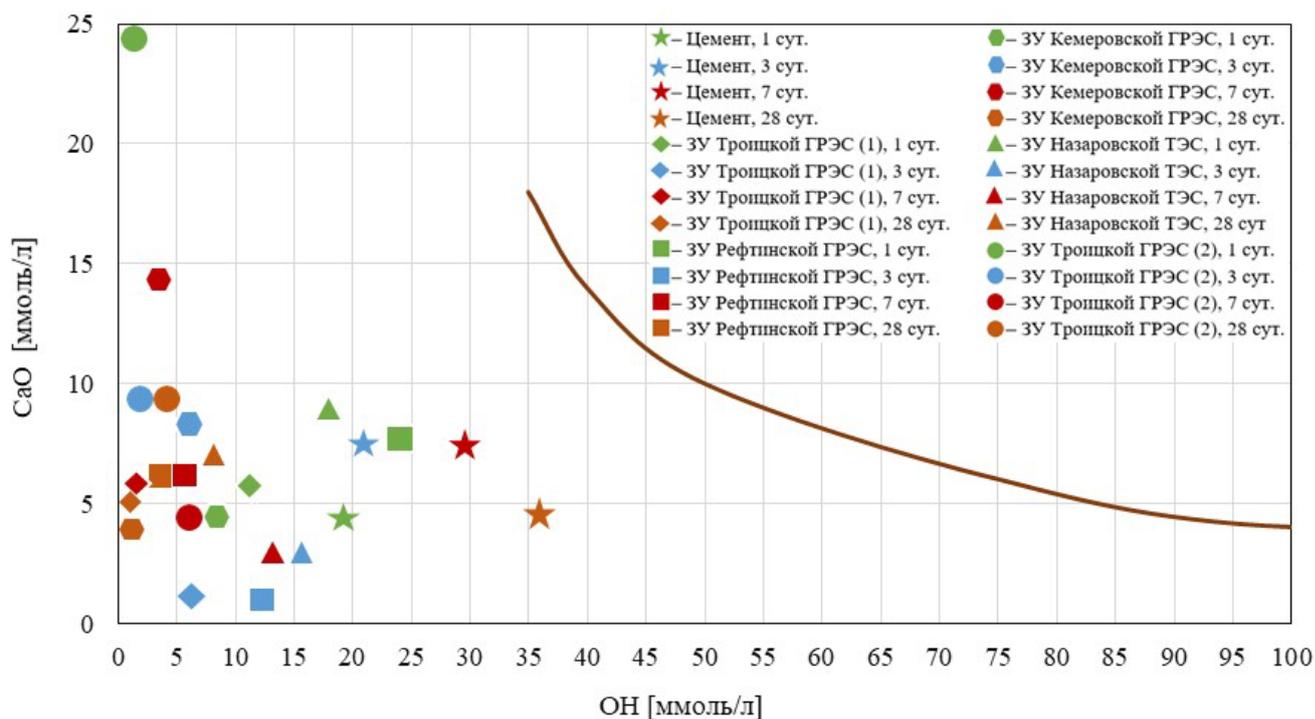
**Рисунок 3.10** – Результаты теста Фраттини

По результатам проведённого анализа зол-уноса методом поглощения извести из известкового раствора (ускоренный тест Фраттини, таблица 3.14, рисунок 3.11) установлено, что все добавки обладают высокой способностью к поглощению в первые сутки. Отмечается различие в характере поглощения  $Ca^{2+}$  и  $OH^-$  с течением времени в зависимости от группы активности (рисунок 3.7).

Таким образом, относящиеся к инертным кислые золы-уноса Троицкой ГРЭС (1) и Рефтинской ГРЭС характеризуются снижением суммарной концентрации  $Ca^{2+}$  и  $OH^-$  с течением времени, так же отмечается что в 1 и 3 сутки преобладает концентрация гидроксильных групп, а в 7 и 28 – ионов  $Ca^{2+}$ .

**Таблица 3.14** – Сравнительная оценка зол-уносапо количеству поглощенного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

Наименование производителя топливных зол	Концентрация, ммоль/л							
	1		3		7		28	
	$\text{OH}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{OH}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{OH}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{OH}^-$	$\text{Ca}^{2+}$
Цемент	19,02	4,99	20,34	7,49	29,52	7,49	35,42	4,99
Троицкая ГРЭС(1)	11,87	6,24	5,83	1,05	2,33	5,14	1,73	4,98
Рефтинская ГРЭС	24,93	7,49	13,12	1,25	5,91	6,25	4,59	6,24
Кемеровская ГРЭС	6,67	4,99	5,56	9,99	3,34	14,98	1,11	4,99
Назаровская ТЭС	18,37	6,26	16,41	2,49	14,43	2,49	9,84	4,99
Троицкая ГРЭС(2)	1,67	24,97	2,22	9,98	5,56	4,99	3,34	9,98

**Рисунок 3.11** – Сравнительная оценка зол-уноса по количеству поглощенного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

Скрыто активные кислая зола-уноса Кемеровской ГРЭС и основная зола-уноса Троицкой ГРЭС (2) характеризуются нелинейным изменением суммарной

концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ . Кислая зола-уноса Кемеровской ГРЭС отличается нарастанием суммарной концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  от 1 к 7 суткам, а затем на 28 сутки указанное значение существенно снижается. При этом в 1 сутки преобладает концентрация гидроксильных групп  $\text{OH}^-$ , тогда как на 3, 7 и 28 преобладает концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$ . Для основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) характерно попеременное нарастание и снижение суммарной концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , при этом в 1 и 3 сутки преобладает концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , в 7 суток – гидроксильных групп  $\text{OH}^-$ , а в 28 суток – ионов  $\text{Ca}^{2+}$ .

Активная основная зола-уноса Назаровской ТЭС, как и инертные золы, характеризуется линейным снижением суммарной концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , однако принципиальное отличие заключается в том, что во все контрольные сроки преобладает концентрация гидроксильных групп  $\text{OH}^-$ , что обусловлено высоким содержанием  $\text{CaO}$  и относительно низким содержанием аморфной составляющей.

Использование **физико-механических (косвенных) методов** позволяет установить эффективность взаимодействия вяжущего с добавкой, косвенно характеризующих интенсивность протекания процессов преимущественно в двух последних фазах гидратации – ускоренное и замедленное твердение. Так активность минеральных добавок в виде зол-уноса ТЭС определялась двумя физико-механическими методами:

1. Определение конца схватывания и водостойкости смеси минеральной добавки с известью, согласно методике, разработанной Бутт Ю.М. и Тимашевым В.В. [128].

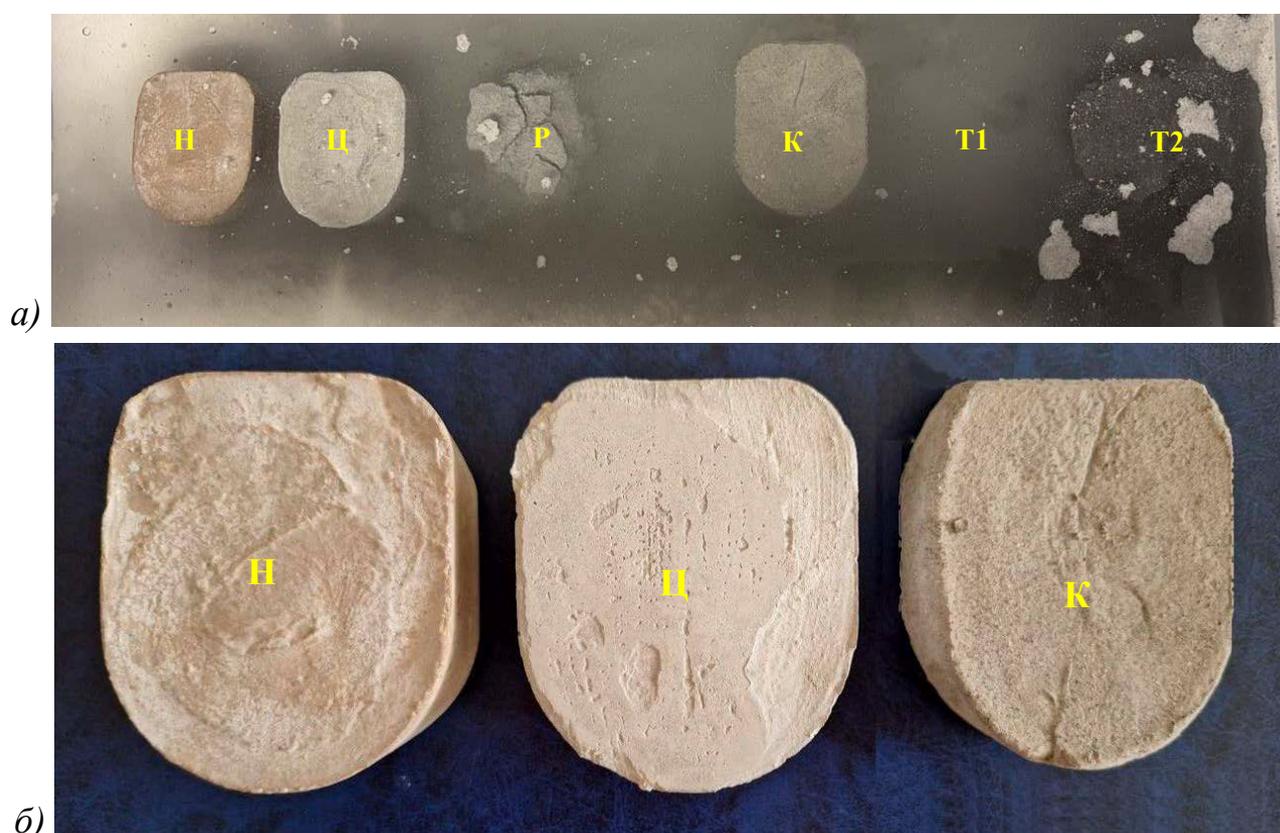
2. Определение  $t$ -критерия согласно ГОСТ 25094–2015 «Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности».

При определении конца схватывания и водостойкости – на этапе подготовки составов смесей, необходимо подобрать водовяжущее отношение, которое для состава смеси с применением цемента составило 0,33; для состава смеси с основными золами-уноса – 0,34; с кислой золой-уноса Рефтинской ГРЭС – 0,32, с золой-уноса Троицкой ГРЭС (1) – 0,39, с золой-уноса Кемеровской ГРЭС – 0,27.

Определение сроков схватывания позволило выявить, что конец схватывания

у образцов смесей, содержащих золу-уноса Назаровской ТЭС и Кемеровской ГРЭС наступил в течение первых суток, у золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) – на 3 суток, а у золы-уноса Троицкой ГРЭС (1) и Рефтинской ГРЭС конец схватывания наступил на 5 суток, т.е. все образцы смесей укладываются в рекомендуемые сроки по данной методике (не позднее 7 суток).

В результате определения водостойкости (рисунок 3.12) установлено, что при погружении образцов в гидравлическую ванну образцы составов смесей с использованием кислых зол-уноса Рефтинской ГРЭС и Троицкой ГРЭС (1), а также основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) полностью разрушаются практически сразу после погружения (рисунок 3.12, а).



**Рисунок 3.12** – Результаты водостойкости смеси минеральных добавок в виде золы-уноса с известью:

Ц – смесь с цементом; Н – смесь с золой-уноса Назаровской ТЭС;  
 Р – Рефтинской ГРЭС; К – Кемеровской ГРЭС; Т1 – Троицкой ГРЭС (1);  
 Т2 – Троицкой ГРЭС (2);

*а* – при погружении в гидравлическую ванну; *б* – по истечении 3 суток

После истечения срока испытания (3 суток, рисунок 3.12, б) полностью сохранили свой объем и геометрическую форму контрольный образец с использованием цемента, образец с использованием добавки в виде основной золы-уноса Назаровской ТЭС, а также образец с использованием кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС. Эти же пробы зол-уноса в сочетании с цементом показали наибольшее суммарное количество выделенного тепла (таблица 3.12), следовательно, именно при использовании кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС и основной золы-уноса Назаровской ТЭС отмечается наибольшая реакционная активность.

Преимущество данного метода заключается в том, что определяется водостойкость образцов добавки с компонентом, моделирующим процесс гидратации вяжущего по истечении 3 суток. Это позволяет на начальном этапе исследований оценить эффективность зол-уноса как активных минеральных добавок, обеспечивающих необходимые эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе цемента для дорожного строительства, подверженных влиянию погодноклиматических факторов.

Что же касается сроков схватывания, то для вяжущих, используемых в дорожном строительстве, важен срок начала схватывания, так как это определяет возможность осуществления технологических операций при устройстве конструктивных слоев из цементобетона до образования кристаллизационных контактов, нарушение которых ведет к неминуемому снижению качества слоя, как правило, это время составляет не менее 90 мин.

В результате определения  $t$ -критерия (таблица 3.15) для зол-уноса показано, что несмотря на высокое содержание рентгеноаморфной составляющей, характерное для рассматриваемых добавок, а также клинкерных минералов в составе золы-уноса Назаровской ТЭС, значение  $t$ -критерия для составов смеси ниже предельно допустимого значения. При этом значение  $t$ -критерия для составов с использованием кислых зол-уноса, относящихся к группе активных минеральных добавок с пуццолановой активностью, практически в 1,6 раза ниже предельного нормируемого значения. Для пробы основной золы-уноса Троицкой ГРЭС (2) значение  $t$ -критерия в 1,2 раза ниже требуемого предельного значения. В соответствии с ГОСТ 25094–2015 ввиду того, что указанные золы-уноса не обеспечивают требуемых зна-

чений  $t$ -критерия они не могут быть использованы в составе композиционных материалов в сочетании с цементом.

**Таблица 3.15** – Требования к физико-механическим показателям зол-уносов как активным минеральным добавкам для цементов (ГОСТ 25094–2015)

Показатель	Норма по ГОСТ	Наименование производителя ЗУ				
		Троицкая ГРЭС (1)	Рефтинская ГРЭС	Кемеровская ГРЭС	Назаровская ТЭС	Троицкая ГРЭС (2)
Значение $t$ -критерия	> 15	9,15	9,32	8,89	15,33	12,57

В свою очередь у состава с использованием золы-уноса Назаровской ТЭС – активной минеральной добавки, обладающей одновременно вяжущими свойствами и пуццолановой активностью, значение  $t$ -критерия выше предельно допустимого значения (таблица 3.15).

Исходя из данных следует, что согласно ГОСТ 25094–2015 среди рассматриваемых минеральных добавок из техногенного алюмосиликатного сырья в виде зол-уносов, образовавшихся при сжигании различных видов углей, считается активной зола-унос Назаровской ТЭС, активность которой обеспечивается высоким суммарным содержанием реакционноспособных компонентов (более 80 %, см. главу 2.2.2, таблица 2.3). Полученные в результате эксперимента данные коррелируют с ранее проведенными исследованиями, где активность зол-уноса определялась по значениям индекса активности на 28 и 90-е сутки (таблица 3.10) согласно методике ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия». При этом следует отметить, что каждая методика из группы физико-механических методов строго регламентирует состав смеси, то есть концентрацию добавки в виде той или иной золы-уноса, тогда как подбор оптимальных концентраций может обеспечить получение заданных прочностных характеристик цементного камня в присутствии зол-уноса.

Таким образом, использование различных методов определения активности минеральных добавок в виде зол-уноса от сжигания углей в разные фазы гидратации цемента позволило установить характер и механизм влияния зол-уноса на

структурообразования, а также взаимосвязь с их химическим и фазовым составом и определить наиболее эффективные добавки, обеспечивающие необходимые параметры процесса гидратации на разных стадиях, что в последствии приводит к достижению требуемых физико-механических параметров. Сопоставимость результатов, полученных с использованием различных методов дает возможность выбрать наиболее подходящую методику с учетом имеющейся материально-технической базы. Кроме того, результаты проведенных исследований хорошо согласуются с полученными ранее данными расчетных критериев, характеризующих группу активности зол исходя из состава, определения индекса активности на 28 и 90-е сутки. Исходя из комплексного анализа активности минеральных добавок в виде зол-уноса по всем критериям в составе цементных систем целесообразно применять лишь золу-уноса Назаровской ТЭС. Ее использование позволяет достигать требуемого значения  $t$ -критерия – выше 15, обеспечивать необходимый срок конца схватывания – не более 7 суток, и водостойкость образцов. При этом, учитывая полученные ранее данные все же целесообразно рассматривать оптимальные концентрационные пределы отдельных проб зол-уноса без дополнительной их обработки с целью качественной замены части цемента для достижения требуемых свойств конечных композитов.

### **3.5 Анализ процесса структурообразования цементного камня в присутствии зол-уноса**

С целью дополнения и расширения теоретических и экспериментальных данных о взаимодействии зол-уноса с цементом в рамках представленной работы произведен анализ процессов структурообразования цементного камня с использованием растровой электронной микроскопии.

В рамках диссертационного исследования в качестве образцов для изучения микроструктуры были подготовлены составы цемента с добавкой в виде зол-уноса различных типов в количестве 25 % от массы цемента в случае с кислыми золами (Троицкой ГРЭС (1), Рефтинской ГРЭС, Кемеровской ГРЭС) и 15 % от массы це-

мента в случае с основными (Назаровской ТЭС и Троицкой ГРЭС (2)). Концентрация добавок в виде зол-уноса в составе вяжущего, подразумевающая его частичную замену, обусловлена экспериментальными исследованиями по подбору составов вяжущего в зависимости от особенностей зол, обеспечивающих требуемую марочную прочность цементного камня. Исследование микроструктуры образцов цементного камня проводилось в возрасте 3, 14, 28 и 90 суток (рисунок 3.13–3.14).

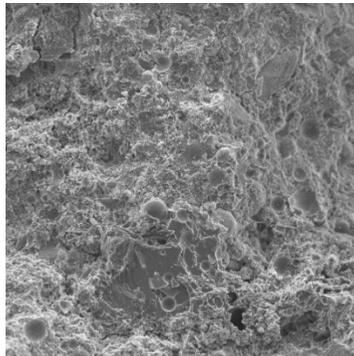
Съемка сколов образцов цементного камня с использованием зол-уноса различного состава в качестве активных минеральных добавок производилась при увеличении  $\times 20\ 000$ . Исходя из полученных снимков видно, что через 3 суток гидратации сколы образцов всех составов не зависимо от типа применяемой золы-уноса характеризуется достаточно рыхлой структурой (рисунок 3.13). В общем объеме материала отмечается большое количество микросфер или сферических кратеров, образованных в результате раскалывания образцов. Рыхлость структуры объясняется большим количеством ранних продуктов гидратации образующих цементный камень – С-S-H-гель и гидросиликаты кальция.

Через 14 суток твердения структура сколов образцов более плотная, однако также отмечается наличие непрореагировавших сферических частиц. Медленное уплотнение структуры объясняется разбавлением вяжущего вводимой добавкой взамен части цемента, что вызывает торможение тепловыделения в результате взаимодействия с водой.

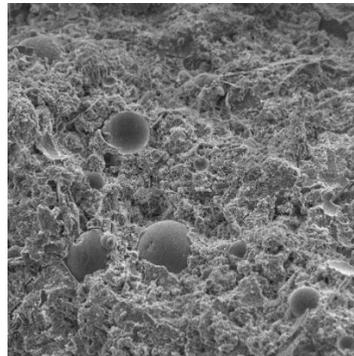
При этом уплотнение структуры в данный период вызвано формированием наиболее стабильных фаз цементного камня представленных гидросульфатоалюминатами и гидроалюминатами кальция.

По истечении 28 суток отмечается практическое отсутствие сферических частиц, не вступивших в реакцию с продуктами гидратации цемента. Лишь единично присутствуют микросферы в образцах с применением зол-уноса Кемеровской ГРЭС и Назаровской ТЭС. При этом сферы начинают обретать шероховатость, свидетельствующую о вступлении оболочек микросфер в реакцию и начале процесса структурообразования. Протекание реакций на таком – достаточно позднем сроке гидратации вызвано степенью аморфизации частиц, которая обуславливает реакционную способность зол-уноса как активных минеральных добавок.

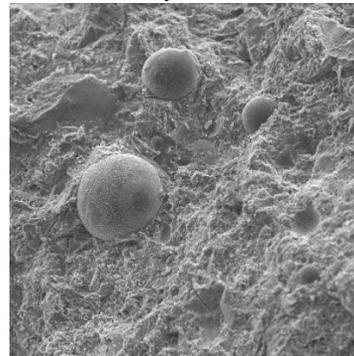
3 суток



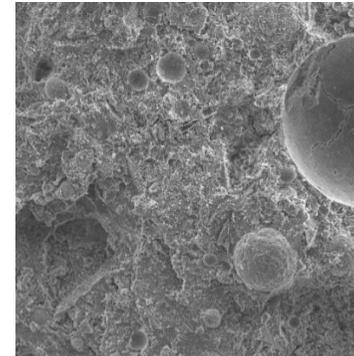
View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 4.83 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



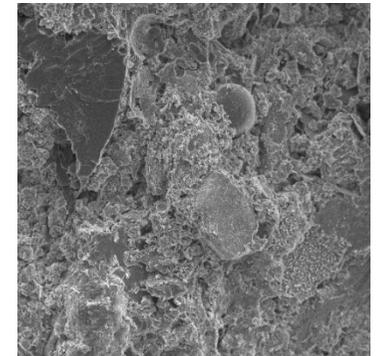
View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 5.63 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 4.79 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

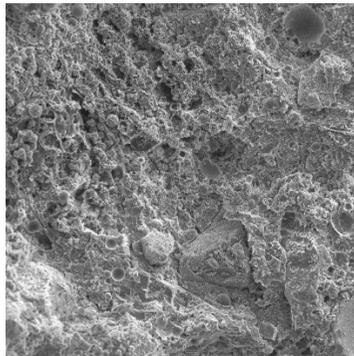


View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 4.77 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

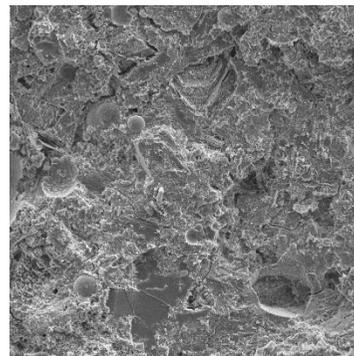


View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 4.87 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

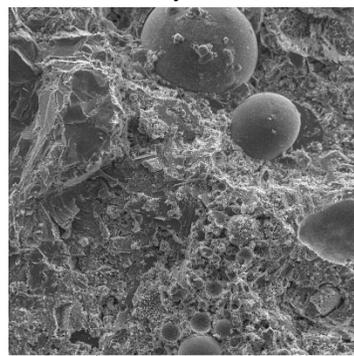
14 суток



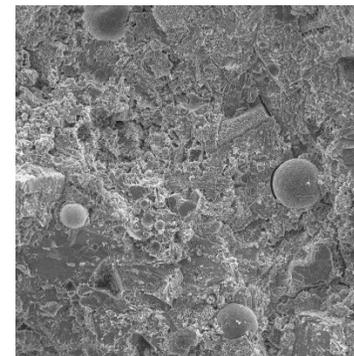
View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 5.00 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



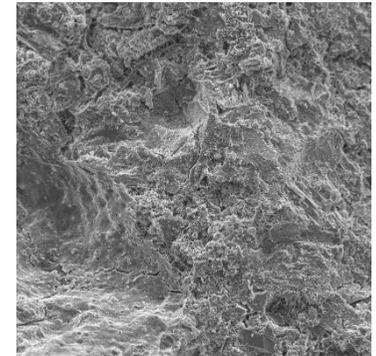
View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 4.48 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 5.16 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 5.04 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



View field: 100.0 µm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 µm  
BI: 8.00 WD: 5.00 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

а)

б)

в)

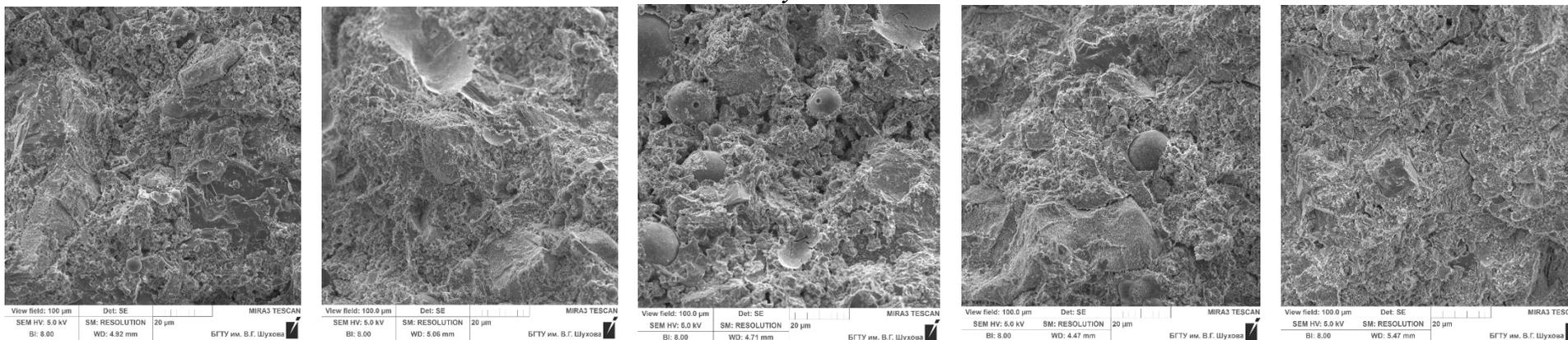
г)

д)

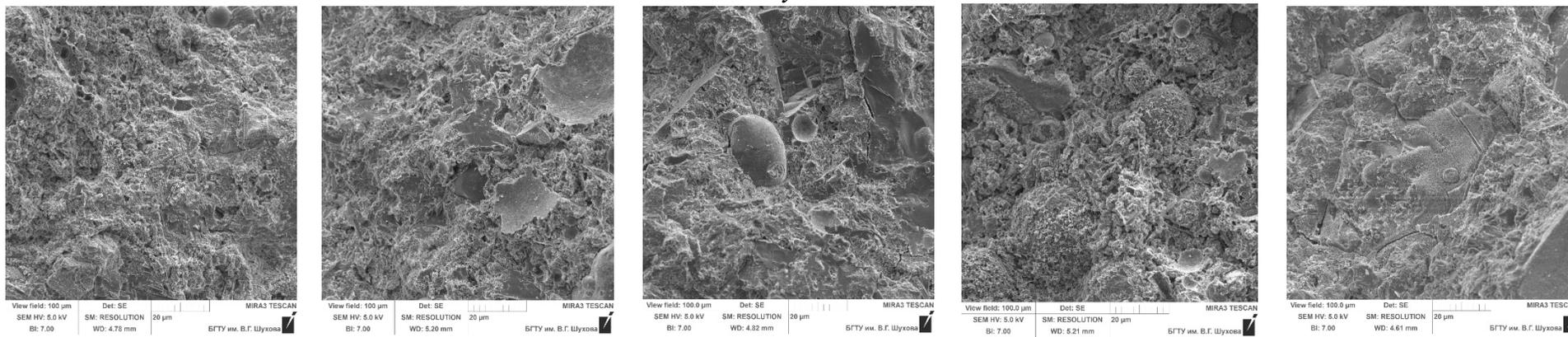
**Рисунок 3.13** – Структурные особенности цементного камня в присутствии зол-уноса различных типов на 3 и 14 сут.:

а – Троицкой ГРЭС (1); б – Рефтинской ГРЭС; в – Кемеровской ГРЭС; г – Назаровской ТЭС; д – Троицкой ГРЭС (2)

28 суток



90 суток



а)

б)

в)

г)

д)

**Рисунок 3.14** – Структурные особенности цементного камня в присутствии зол-уноса различных типов на 28 и 90 сут.:

а – Троицкой ГРЭС (1); б – Рефтинской ГРЭС; в – Кемеровской ГРЭС; г – Назаровской ТЭС; д – Троицкой ГРЭС (2).

На 90 сутки картина существенно не меняется. Также, как и на 28 сутки, в структуре образцов цементного камня с использованием зол-уноса Кемеровской ГРЭС (и Назаровской ТЭС единично идентифицируются частицы в виде микросфер. Однако, на месте некоторых микросфер отмечаются сферические полые агрегаты, образование в результате полной гидратации стенок микросфер и кристаллообразованием внутри поры.

Проведенный анализ образцов цементного камня оптимальных составов с использованием зол-уноса различных типов показал, что в целом к 28 суткам (нормируемый срок набора марочной прочности) все образцы обладают достаточно плотной структурой, в которой варьируется наличие микросфер, являющихся основным компонентом зол-уноса, и, непосредственно отвечающих за их реакционную способность. При этом справедливо отметить, что при переходе между типами и группами активности зол-уноса интенсивность и механизмы процессов структурообразования нивелируются за счет вариативности их состава (наличие содержание общего количества СаО, углистых примесей в виде частиц отличной от сферической формы, а также клинкерных минералов) на ряду с рентгеноаморфной составляющей. В свою очередь отсутствие значимых дефектов общей матрицы рассмотренных образцов после 28 суток позволяет сделать вывод о справедливости подобранных составов.

### 3.6 Выводы

1. На основании опыта применения техногенного и вторичного сырья в составе различных композиционных материалов, с учетом нормативных документов, регламентирующих требования к исследуемым в работе видам сырья и конечным материалам, а также научно признанных методик разработан дизайн эксперимента, основой которого является анализ характеристик исходных сырьевых материалов и органических композитов – асфальтогранулобетонов на их основе, который включает: исследование физико-механических и физико-химических свойств асфальтогранулята и зол-уноса; подбор рациональных составов и анализ свойств составов асфальтогранулобетона на основе исследуемого сырья; оценка технического уровня качества и конкурентноспособности АГБ на основе вторичного и техногенного сырья;

разработка конструкций автомобильных дорог с их использованием и рекомендаций по применению.

2. Анализ совокупности полученных результатов показал, что с увеличением срока эксплуатации асфальтобетона качество вторичного сырья в виде асфальтобетонного гранулята, выраженное его компонентным составом, существенно снижается, что ведет к корректировке зернового состава, а также необходимости введения основных структурообразующих компонентов – вяжущих. Причем, чем ниже содержание ароматических углеводородов в битуме, тем выше вероятность необходимости введения цемента, а чем выше их содержание – тем вероятнее применение эмульсии. Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые пробы асфальтобетонного гранулята можно использовать по наиболее экономичной технологии холодной регенерации с учетом введения необходимого количества минеральной части при этом возможно применение как битумной эмульсии, так и цемента. В первом случае будет достигаться бóльший экономический эффект за счет сниженного расхода вяжущего, но при проектировании следует учитывать получение материала нежесткого типа. Применение же цементного вяжущего с введением дополнительных минеральных компонентов более дорогостоящий вариант. Однако, конечный материал в данном случае будет полужесткого типа, обладающий более высокими прочностными показателями и потенциалом функционального применения в различных конструктивных слоях дорожных одежд. Пробы № 2 и 4 возможно также применять в качестве техногенного грунта для отсыпки временных проездов или для устройства оснований автомобильных дорог (необходимость укрепления определяется исходя из требований к проектируемой конструкции в зависимости от категории дороги). Проведенный анализ свойств асфальтобетонного гранулята позволил произвести комплексную оценку с позиции его повторного использования и необходимости введения дополнительных компонентов, в частности введения конкретных видов вяжущих.

3. Комплексный анализ двух проб зол-уноса различных типов позволил установить ключевые особенности каждой пробы. Использование научно обоснованных методик с применением высокоточного оборудования позволило комплексно оценить

вклад дисперсности зол-уноса, их состава и морфоструктурных особенностей на кислотно-основные свойства (или донорно акцепторную способность), определяющие характер и механизм взаимодействия зол-уноса с различными видами вяжущих. Тогда как, по результатам испытаний на основании нормативной документации каждая из проб хотя бы по одному показателю не соответствует требованиям. В этой связи целесообразен подбор оптимальных концентраций рассматриваемых проб зол-уноса различных типов (в зависимости от вида применяющегося вяжущего или комплексного использования вяжущих) с учетом необходимости обеспечения запаса прочности. Отдельное внимание следует уделить изучению характера и механизмов взаимодействия каждой пробы зол-уноса с цементом с применением различных методик (прямые/косвенные) определения их активности, позволяющих произвести комплексную оценку их влияния на протекание процессов от начала гидратации до набора марочной прочности.

4. Использование различных методов определения активности минеральных добавок в виде зол-уноса от сжигания углей в разные фазы гидратации цемента позволило установить характер и механизм влияния зол-уноса на структурообразование, а также взаимосвязь с их химическим и фазовым составом и определить наиболее эффективные добавки обеспечивающие необходимые параметры процесса гидратации на разных стадиях, что в последствии приводит к достижению требуемых физико-механических параметров. Сопоставимость результатов разнообразия применяемых методов дает возможность выбрать наиболее подходящую методику с учетом имеющейся материально-технической базы. Кроме того, результаты проведенных исследований хорошо согласуются с полученными ранее данными расчетных критериев, характеризующих группу активности зол исходя из состава, определения индекса активности на 28 и 90-е сутки. Исходя из комплексного анализа активности минеральных добавок в виде зол-уноса по всем критериям в составе цементных систем целесообразно применять лишь золу-уноса Назаровской ТЭС. Ее использование позволяет достигать требуемого значения  $t$ -критерия – выше 15, обеспечивать необходимый срок конца схватывания – не более 7 суток и водостойкость образцов. При этом, учитывая полученные ранее данные все же целесообразно рассматривать

оптимальные концентрационные пределы отдельных проб зол-уноса без дополнительной их обработки с целью качественной замены части цемента для достижения требуемых свойств конечных композитов.

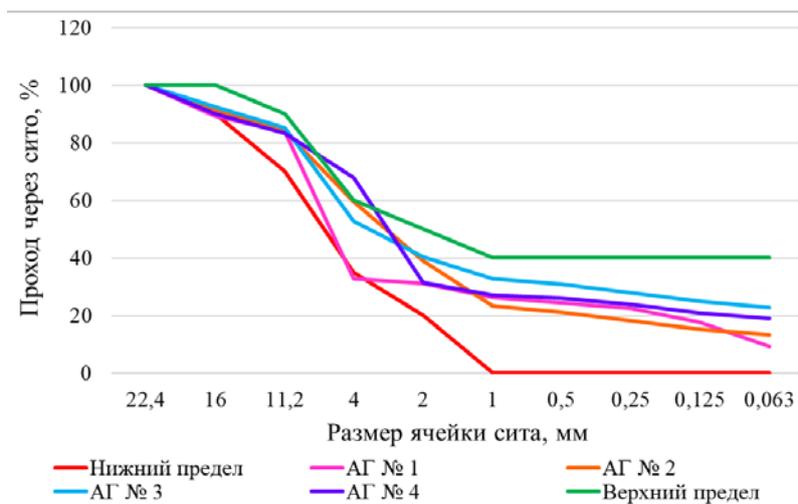
5. Проведенный анализ образцов цементного камня оптимальных составов с использованием зол-уноса различных типов показал, что в целом к 28 суткам (нормируемый срок набора марочной прочности) все образцы обладают достаточно плотной структурой, в которой варьируется наличие микросфер, являющихся основным компонентом зол-уноса, и, непосредственно отвечающих за их реакционную способность. При этом справедливо отметить, что при переходе между типами и группами активности зол-уноса интенсивность и механизмы процессов структурообразования нивелируются за счет вариативности их состава (наличие содержание общего количества СаО, углистых примесей в виде частиц отличной от сферической формы, а также клинкерных минералов) на ряду с рентгеноаморфной составляющей. В свою очередь отсутствие значимых дефектов общей матрицы рассмотренных образцов после 28 суток позволяет сделать вывод о справедливости подобранных составов.

## **4 СОСТАВЫ И СВОЙСТВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОНА НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРОБ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ГРАНУЛЯТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗОЛ-УНОСА**

### **4.1 Подбор составов асфальтогранулобетонных смесей с применением методики математического моделирования**

Использование вторичного и техногенного сырья при строительстве автомобильных дорог вызывает особый интерес в виду возможности частичной или полной замены традиционных материалов, что дает возможность рационализировать подходы по использованию природных ресурсов и снизить стоимость строительства. Для дорожного строительства актуальным является вопрос применения асфальтобетонного гранулята (АГ) полученного путем холодного фрезерования асфальтобетонного покрытия, однако в течении срока эксплуатации покрытия снижаются свойства АГ, в частности из-за необратимого процесса старения основного структурообразующего компонента – вяжущего и утрате его физико-механических свойств. Неотъемлемой процедурой при повторном использовании асфальтогранулята является подбор состава органоминеральных и асфальтогранулобетонных смесей, требующий обязательного введения свежих вяжущих веществ, диапазоны процентного содержания которых регулируются отраслевой документацией. Также при необходимости могут вводиться минеральные заполнители (песок, щебень) и добавки. Допустимые диапазоны процентного содержания указанных компонентов в составе смесей регулируется нормативной документацией и в случае заполнителей напрямую зависит от зернового состава асфальтобетонного гранулята. В нашем случае, учитывая состав проб асфальтогранулята (рисунок 1), в соответствии с ГОСТ Р 70197.1–2022 корректировка зернового состава не требуется лишь у проб № 2 и 3. В этой связи целесообразно рассматривать указанные асфальтогрануляты для получения асфальтогранулобетонных смесей. При этом на основании данных о максимальном размере зерен,

установлено, что возможно получение асфальтогранулобетонных смесей АГБС 16.



**Рисунок 4.1** – Зерновой состав асфальтогранулята в результате различных сроков эксплуатации

битум, предполагается введение минерального вяжущего с добавкой (цемент + зола-уноса), а в состав с пробой асфальтобетонного гранулята № 2, из-за высокой степени старения битума, предполагается введение комплекса вяжущих с добавкой, т.е. цемента, золы-уноса и битумной эмульсии.

На основании проведенного комплекса исследований установлено, что в составе асфальтогранулобетонных смесей как при использовании минерального вяжущего, так и при совместном использовании минерального и органического вяжущего, наиболее целесообразно рассматривать использование основной золы-уноса – Назаровской ТЭС, а также кислой золы-уноса Кемеровской ГРЭС.

В рамках диссертационного исследования с целью установления оптимальных границ варьирования компонентным составом для достижения экстремальных значений физико-механических характеристик конечных композитов применен метод математического моделирования, являющийся наиболее эффективным инструментом. Математическое моделирование производилось на основе имеющихся данных промежуточных экспериментальных испытаний. С учетом рекомендаций по порядку подбора составов АГБС ОДМ 218.6.1.005-2021 и требований к физико-механическим показателям АГБ, отраженных в ГОСТ Р 70197.1–2022, в качестве

Важнейшим фактором, влияющим на вид применяемого вяжущего или возможное комплексное применение различных видов вяжущих в составе асфальтогранулобетона является степень старения битума. Так в составы смеси с пробой асфальтогранулята № 3, содержащей менее состаренный

параметров варьирования были выбраны концентрационные пределы для:

- минерального вяжущего – цемента марки ЦЕМ I 42,5 Н – 2–4 %;
- эмульсии битумной дорожной катионной медленнораспадающейся марки ЭБДК–М – 2–4 %;
- золы-уноса – 10–20 % (при использовании кислых зол-уноса в составе АГБС на основе минерального вяжущего), 20–30 % (при использовании основных зол-уноса в составе АГБС на основе минерального вяжущего); 24–38 % (при использовании кислых зол-уноса в составе АГБС на основе комплекса вяжущих);
- воды 40–60 %.

Следует отметить, что в соответствии с методическими рекомендациями по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (ОДМ 218.6.1.005-2021) количество вяжущих назначается сверх 100 % заполнителя (асфальтогранулята). Количество воды определяется с учетом фактической влажности компонентов и их водопотребности, но не должно превышать 100 % от массы минерального вяжущего. Количество золы-уноса так же регулируется указанным отраслевым документом и рекомендуется вводить от 3 до 5 % сверх 100 % заполнителя, т.е. даже в большем количестве чем вяжущих. Однако учитывая результаты исследований по вариативности свойств зол-уноса различных типов и их влияния на свойства вяжущих систем различного типа твердения, в том числе в составе полужестких композитов в виде цементасфальтобетона [156, 157], принято решение использовать в составах АГБС эффективные концентрационные пределы от массы применяемых вяжущих, установленные экспериментальным путем и указанные выше. Следует также отметить, что в составах с использованием лишь минерального вяжущего возможно использование как кислых, так и основных зол-уноса в соответствии с установленными экспериментально концентрационными пределами, а в составе с использованием комплекса связующих целесообразно использование лишь кислых зол. Это связано с негативным влиянием основных зол-уноса на технологические свойства преиму-

щественно битумных эмульсий и в меньшей степени цементных систем, что препятствует достижению однородности смесей и соответственно негативно отражается на конечных свойствах композиционного материала.

Таким образом, в результате формирования варьируемых параметров с учетом разновидностей составов, определенных классификацией отраслевого документа, и типа применяемой в составе АГБС золы-уноса разработаны 3 варианта параметров варьирования (таблица 4.1–4.3).

**Таблица 4.1** – Варьируемые параметры для асфальтогранулобетонной смеси на основе минерального вяжущего с номинальным максимальным размером зерен применяемого заполнителя 16,0 мм (АГБС 16-М) в присутствии кислых зол-уноса

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Цемент, %	$X_1$	2	3	4	1
Зола-уноса, %	$X_2$	20	25	30	5
Вода, %	$X_3$	40	50	60	10

**Таблица 4.2** – Варьируемые параметры для асфальтогранулобетонной смеси на основе минерального вяжущего с номинальным максимальным размером зерен применяемого заполнителя 16,0 мм (АГБС 16-М) в присутствии основных зол-уноса

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Цемент, %	$X_1$	2	3	4	1
Зола-уноса, %	$X_2$	10	15	20	5
Вода, %	$X_3$	40	50	60	10

**Таблица 4.3** – Варьируемые параметры для асфальтогранулобетонной смеси на основе комплексного вяжущего с номинальным максимальным размером зерен применяемого заполнителя 16,0 мм (АГБС 16-К) в присутствии кислых зол-уноса

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Цемент, %	X <sub>1</sub>	2	3	4	1
Битумная эмульсия, %	X <sub>2</sub>	2	3	4	1
Зола-уноса, %	X <sub>3</sub>	24	31	38	7

Можно заметить, что в рамках математического моделирования исключены составы без использования активных минеральных добавок в виде зол-уноса, так как эти данные не информативны в части оценки влияния зол-уноса на физико-механические свойства составов асфальтогранулобетона.

В результате, в качестве выходных параметров в соответствии с отраслевым документом для образцов асфальтогранулобетонов выбраны такие физико-механические параметры как:

- 1) водостойкость;
- 2) предел прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С (в возрасте 7 суток), МПа;
- 3) предел прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С (в возрасте 28 суток), МПа.

На основе матрицы планирования были получены образцы АГБ на из смесей с использованием минерального вяжущего (цемента) с добавками в виде кислой и основной зол-уноса, а также из смесей с использованием комплекса вяжущих и кислой золы-уноса и определены их физико-механические свойства (таблица 4.4–4.6).

**Таблица 4.4** – Матрица варьирования и выходные параметры эксперимента для АГБС 16-М при использовании кислой золы-уноса

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Цемент, %	Вода, %	Зола-уноса, %	R <sub>40</sub> (7 суток), кПа	R <sub>20</sub> (28 суток), кПа	Водостойкость
1	+1	+1	+1	4	60	30	0,46	1,39	0,69
2	+1	-1	+1	4	40	30	0,53	1,44	0,87
3	-1	+1	+1	2	60	30	0,38	1,32	0,63
4	-1	-1	+1	2	40	30	0,25	1,24	0,56
5	+1	+1	-1	4	60	20	0,50	1,41	0,72
6	+1	-1	-1	4	40	20	0,54	1,46	0,91
7	-1	+1	-1	2	60	20	0,46	1,43	0,69
8	-1	-1	-1	2	40	20	0,37	1,34	0,62

**Таблица 4.5** – Матрица варьирования и выходные параметры эксперимента для АГБС 16-М  
при использовании основной золы-уноса

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Цемент, %	Вода, %	Зола-уноса, %	R <sub>40</sub> (7 суток), кПа	R <sub>20</sub> (28 суток), кПа	Водостойкость
1	+1	+1	+1	4	60	20	0,43	1,34	0,74
2	+1	-1	+1	4	40	20	0,55	1,40	0,98
3	-1	+1	+1	2	60	20	0,29	1,29	0,65
4	-1	-1	+1	2	40	20	0,21	1,19	0,59
5	+1	+1	-1	4	60	10	0,49	1,36	0,72
6	+1	-1	-1	4	40	10	0,57	1,42	0,93
7	-1	+1	-1	2	60	10	0,53	1,37	0,69
8	-1	-1	-1	2	40	10	0,34	1,31	0,61

**Таблица 4.6** – Матрица варьирования и выходные параметры эксперимента для АГБС 16-К при использовании кислой золы-уноса

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Цемент, %	Битумная эмульсия, %	Зола-уноса, %	R <sub>40</sub> (7 суток), кПа	R <sub>20</sub> (28 суток), кПа	Водостойкость
1	+1	+1	+1	4	4	38	0,32	1,15	0,64
2	+1	-1	+1	4	2	38	0,40	1,21	0,71
3	-1	+1	+1	2	4	38	0,31	1,08	0,49
4	-1	-1	+1	2	2	38	0,23	0,99	0,43
5	+1	+1	-1	4	4	24	0,35	1,19	0,68
6	+1	-1	-1	4	2	24	0,41	1,23	0,76
7	-1	+1	-1	2	4	24	0,38	1,21	0,71
8	-1	-1	-1	2	2	24	0,31	1,13	0,61

По полученным данным были рассчитаны уравнения регрессии:

– для предела прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С через 7 суток твердения образцов АГБ на основе минерального вяжущего с добавкой в виде кислой золы-уноса:

$$y = -0,09772 + 6,71x_1 + 0,057x_2 + 0,011x_3 + 0,171708x_1^2 + 0,171708x_2^2 + 0,172x_3^2 + 0,01875x_1x_2 - 0,04125x_2x_3 + 0,00125x_1x_3;$$

– для предела прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С через 28 суток твердения образцов АГБ на основе минерального вяжущего с добавкой в виде кислой золы-уноса:

$$y = -0,30884 + 6,71x_1 + 0,037x_2 + 0,007x_3 + 0,54268x_1^2 + 0,5427x_2^2 + 0,543x_3^2 + 0,02125x_1x_2 - 0,03375x_2x_3 - 0,00125x_1x_3;$$

– для водостойкости образцов АГБ на основе минерального вяжущего с добавкой в виде кислой золы-уноса:

$$y = -0,15932 - 0,019x_1 + 0,069x_2 - 0,023x_3 + 0,279948x_1^2 + 0,279948x_2^2 + 0,280x_3^2 + 0,00625x_1x_2 - 0,06375x_2x_3 + 0,00125x_1x_3;$$

– для предела прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С через 7 суток твердения образцов АГБ на основе минерального вяжущего с добавкой в виде основной золы-уноса:

$$y = -0,09548 + 6,71x_1 + 0,067x_2 + 0,007x_3 + 0,167772x_1^2 + 0,167772x_2^2 + 0,168x_3^2 + 0,03625x_1x_2 - 0,05875x_2x_3 - 0,01875x_1x_3;$$

– для предела прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С через 28 суток твердения образцов АГБ на основе минерального вяжущего с добавкой в виде основной золы-уноса:

$$y = -0,29904 + 6,71x_1 + 0,036x_2 + 0,004x_3 + 0,525456x_1^2 + 0,525456x_2^2 + 0,525x_3^2 + 0,02000x_1x_2 - 0,03500x_2x_3 + 0,00500x_1x_3;$$

– для водостойкости образцов АГБ на основе минерального вяжущего с добавкой в виде основной золы-уноса:

$$y = -0,16184 - 0,014x_1 + 0,096x_2 - 0,034x_3 + 0,284376x_1^2 + 0,284376x_2^2 + 0,284x_3^2 + 0,00000x_1x_2 - 0,07000x_2x_3 + 0,00250x_1x_3;$$

– для предела прочности при непрямом растяжении при температуре

40 °С через 7 суток твердения образцов АГБ на основе комплексного вяжущего с добавкой в виде кислой золы-уноса:

$$y = -0,07588 + 6,71x_1 + 0,025x_2 + 0,001x_3 + 0,133332x_1^2 + 0,133332x_2^2 + 0,133x_3^2 + 0,01375x_1x_2 - 0,03625x_2x_3 - 0,00125x_1x_3;$$

– для предела прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С через 28 суток твердения образцов АГБ на основе комплексного вяжущего с добавкой в виде кислой золы-уноса:

$$y = -0,25732 + 6,71x_1 + 0,037x_2 + 0,007x_3 + 0,452148x_1^2 + 0,452148x_2^2 + 0,452x_3^2 + 0,02625x_1x_2 - 0,03375x_2x_3 - 0,00125x_1x_3;$$

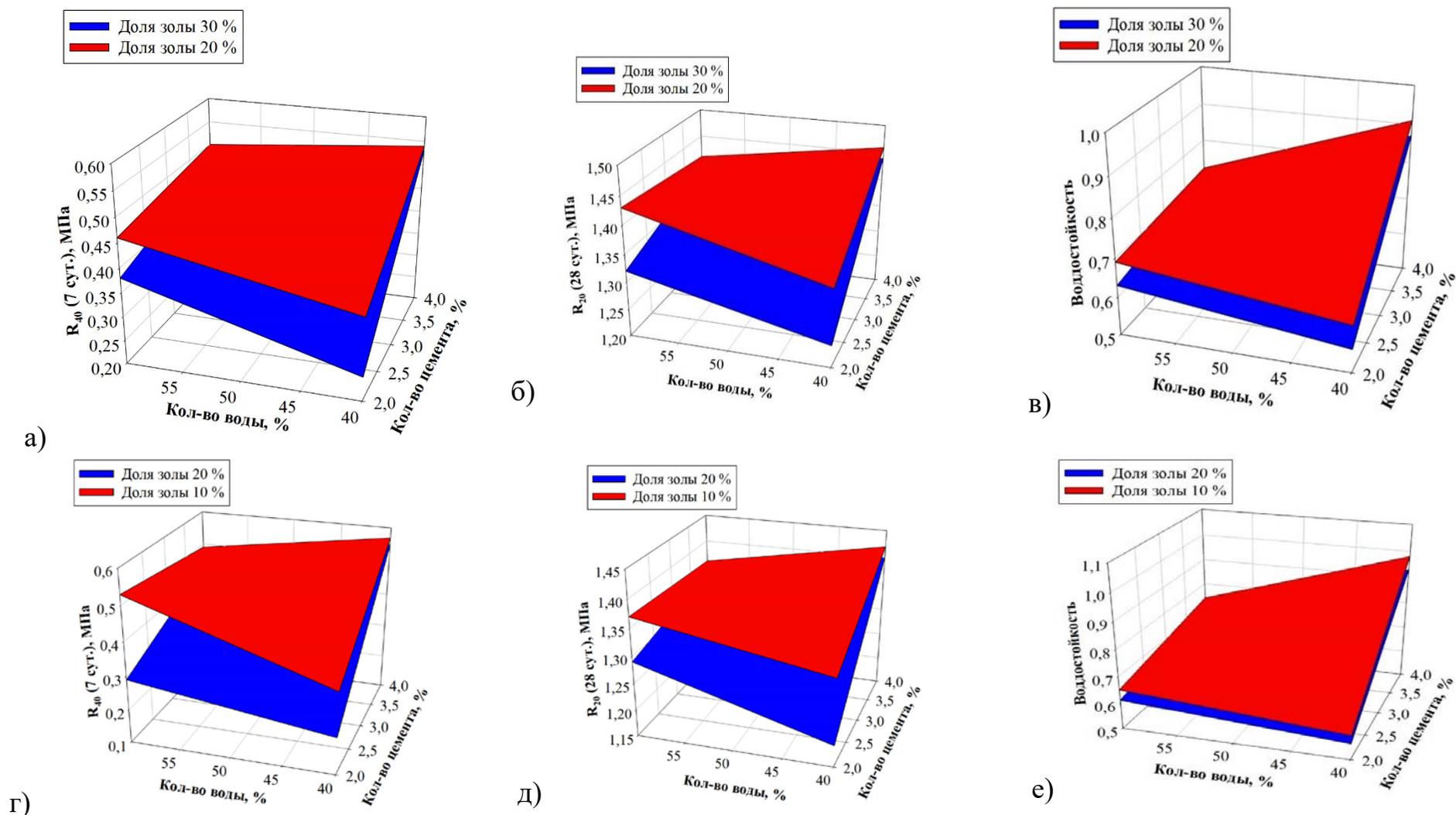
– для водостойкости образцов АГБ на основе комплексного вяжущего с добавкой в виде кислой золы-уноса:

$$y = -0,14084 + 6,71x_1 + 0,055x_2 + 0,001x_3 + 0,247476x_1^2 + 0,247476x_2^2 + 0,247x_3^2 + 0,03875x_1x_2 - 0,03875x_2x_3 - 0,00375x_1x_3.$$

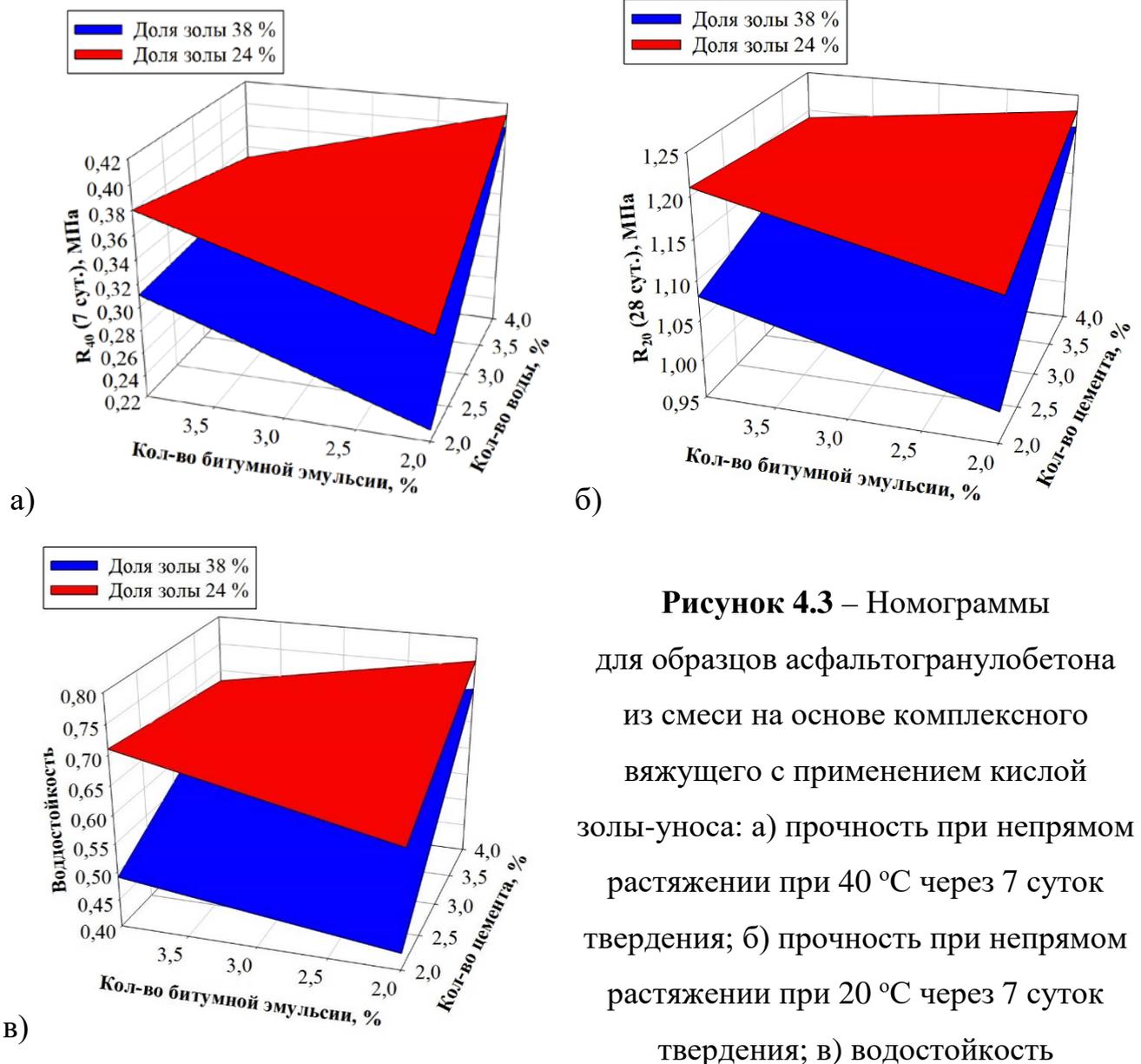
По рассчитанным уравнениям регрессии построены зависимости, устанавливающие взаимосвязь состава и количественного содержания вводимых в асфальтогранулобетонную смесь компонентов на свойства асфальтогранулобетона (рисунок 4.2, 4.3).

Анализ полученных данных позволил установить следующее – изменение значений прочностных характеристик и водостойкости составов асфальтогранулобетонов имеет линейную зависимость от количества цемента с добавкой золы-уноса и количества воды/битумной эмульсии (жидкой фазы) участвующей в реакциях гидратации.

Отмечается, что при увеличении цемента от 2 до 4 % и воды (от 40 до 60 %) битумной эмульсии (от 2 до 4 %), а также доли золы-уноса в составе композита в соответствии с ее типом и присутствующей жидкой фазой прочностные характеристики как при 40 °С на 7 суток (когда образцы набирают 60–70 % прочности, рисунок 4.2, а), г), 4.3, а), так и при 20 °С на 28 суток (рисунок 4.2, г), д), 4.3, б) существенно снижается. Эта тенденция сохраняется и для водостойкости образцов различных составов асфальтогранулобетона (рисунок 4.2, в), е)).



**Рисунок 4.2** – Номограммы для образцов асфальтогранулобетона из смесей на основе минерального вяжущего с использованием зол-уноса различных типов: а), б), в) – с применением кислых зол-уноса; г), д), е) – с применением основной золы-уноса; а), г) – прочность при непрямом растяжении при 40 °С через 7 суток твердения; б), д) – прочность при непрямом растяжении при 20 °С через 7 суток твердения; в), е) – водостойкость



**Рисунок 4.3 – Номограммы**  
 для образцов асфальтогранулобетона  
 из смеси на основе комплексного  
 вяжущего с применением кислой  
 золы-уноса: а) прочность при непрямом  
 растяжении при 40 °С через 7 суток  
 твердения; б) прочность при непрямом  
 растяжении при 20 °С через 7 суток  
 твердения; в) водостойкость

Это обусловлено рядом факторов, связанных с особенностями протекания реакций в цементных системах в присутствии зол-уноса при взаимодействии с водой. При увеличении количества зол-уноса происходит разбавление вяжущего в присутствии воды, а в избыточно разбавленной системе процессы гидратации протекают слабее, и, как следствие, увеличивается время твердения системы, что приводит к снижению прочностных показателей в установленные сроки. Кроме того, в присутствии избыточного количества воды частицы цемента с добавкой находятся на большом удалении друг от друга, что приводит к формированию неоднородной

структуры с наличием пор и пустот и впоследствии негативно сказывается на водостойкости образцов составов асфальтогранулобетона. Это справедливо как для составов на основе минерального вяжущего в присутствии добавок с использованием воды, так и для составов на основе комплексного вяжущего в присутствии добавок, так как при введении в систему эмульсии происходит ее распад, в результате которого отделившаяся вода вступает в реакцию с цементом.

Снижение прочности отмечается и в случае сниженного содержания цемента, воды/битумной эмульсии и зол-уноса, что объясняется отсутствием активных процессов гидратации из-за нехватки воды.

На основании данных прочностных характеристик установлено, что максимальные значения прочности достигаются при среднем содержании зол-уноса в составах асфальтогранулобетонных смесей (25% для кислых зол в составе АГБС на основе минерального вяжущего; 15 % для основных зол в составе АГБС на основе минерального вяжущего; 31 % для кислых зол в составе АГБС на основе комплекса связующих) при этом количество цемента составляет 3 % для всех систем, количество воды – 50 %, битумной эмульсии – 3 %. Выполнение номограмм при увеличении доли цемента до 4 % свидетельствует о незначительном приросте рассматриваемых характеристик, поэтому увеличение доли цемента в составе АГБС является нецелесообразным

Таким образом, на основании анализа полученных в результате математического моделирования данных произведена оценка целесообразности и эффективности дозировок вяжущих, добавки в виде зол-уноса различных типов и воды. В результате установлено, что наиболее рациональным решением с позиции достижения экстремальных значений требуемых параметров, позволяющих использовать композиционные материалы являются составы: для асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-М(К) – 3 % цемента, 25 % кислой золы-уноса, 50 % -воды; для асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-М(О) – 3% цемента, 15 % основной золы-уноса, 50 % воды; для асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-К – 3 % цемента; 25 % кислой золы-уноса; 3 % битумной эмульсии.

## 4.2 Физико-механические свойства составов асфальтогранулобетона в зависимости от вида применяемого вяжущего и типа золы-уноса

Для оценки эффективности и целесообразности применения вторичного и техногенного сырья различного состава в качестве основных компонентов при получении переработанных органоминеральных дорожно-строительных композитов и установления возможности их использования в различных слоях конструкций автомобильных дорог в рамках диссертационного исследования изучены требуемые физико-механические характеристики получаемых материалов в соответствии с ГОСТ Р 70197.1–2022 и ОДМ 218.6.1.005-2021, регламентирующим требуемые физико-механические показатели асфальтогранулобетона, к которым относят: водостойкость, предел прочности при непрямом растяжении при температуре 22 и 40 °С в возрасте 7 суток, предел прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С в возрасте 28 суток.

Для испытаний на основании полученных выше данных были заформованы и испытаны образцы трех составов асфальтогранулобетонов (таблица 4.7–4.9). Прежде чем переходить к анализу физико-механических характеристик следует отметить, что для подготовки образцов для проведения испытаний было выбрано по одной пробе асфальтогранулята из условных двух групп.

**Таблица 4.7** – Компонентный состав асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-М с использованием кислой золы-уноса

Наименование сырьевого компонента	Количество, % (вяжущие сверх 100 %)	Количество, % (вяжущие в 100 %)
Асфальтогранулят проба №3	100	95,70
Цемент ЦЕМ I 42,5 Н	2,25	2,15
Зола-уноса Троицкой ГРЭС	0,75	0,70
Вода	1,5	1,45

**Таблица 4.8** – Компонентный состав асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-М с использованием основной золы-уноса

Наименование сырьевого Компонента	Количество, % (вяжущие сверх 100 %)	Количество, % (вяжущие в 100 %)
Асфальтогранулят проба №3	100	95,70
Цемент ЦЕМ I 42,5 Н	2,25	2,44
Зола-уноса Назаровской ТЭС	0,45	0,43
Вода	1,5	1,43

**Таблица 4.9** – Компонентный состав асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-К с использованием основной золы-уноса

Наименование сырьевого Компонента	Количество, % (вяжущие сверх 100 %)	Количество, % (вяжущие в 100 %)
Асфальтогранулят проба №4	100	94,18
Цемент ЦЕМ I 42,5 Н	2,5	2,35
Битумная эмульсия ЭБДК М	3	2,83
Зола-уноса Троицкой ГРЭС	0,68	0,64

То есть для подготовки смесей с применением лишь минерального вяжущего с добавкой была использована проба асфальтогранулята №3, в составе которой битум еще способен сопротивляться нагрузкам, но эксплуатируемая дольше, чем проба №1.

При этом, рассмотрено 2 варианта смесей на основе минерального вяжущего:

1. С использованием кислой золы-уноса Троицкой ГРЭС (при замене 25 % вяжущего) – АГБС 16-М(К);
2. С использованием основной золы-уноса Назаровской ТЭС (при замене 15 % вяжущего) – АГБС 16-М(О).

Для подготовки образцов из смесей на основе комплексного вяжущего (цемент + битумная эмульсия, АГБС 16-К) использована проба асфальтобетонного гранулята №2, в составе которой битум не способен сопротивляться нагрузкам и эксплуатируемая дольше, чем проба №4, и кислая зола-уноса Троицкой ГРЭС. При этом, в состав смеси вводится суммарное количество золы, необходимое для участия в процессах структурообразования при взаимодействии с вяжущими, то есть 25 % для замены цемента и 6 % от массы битумной эмульсии.

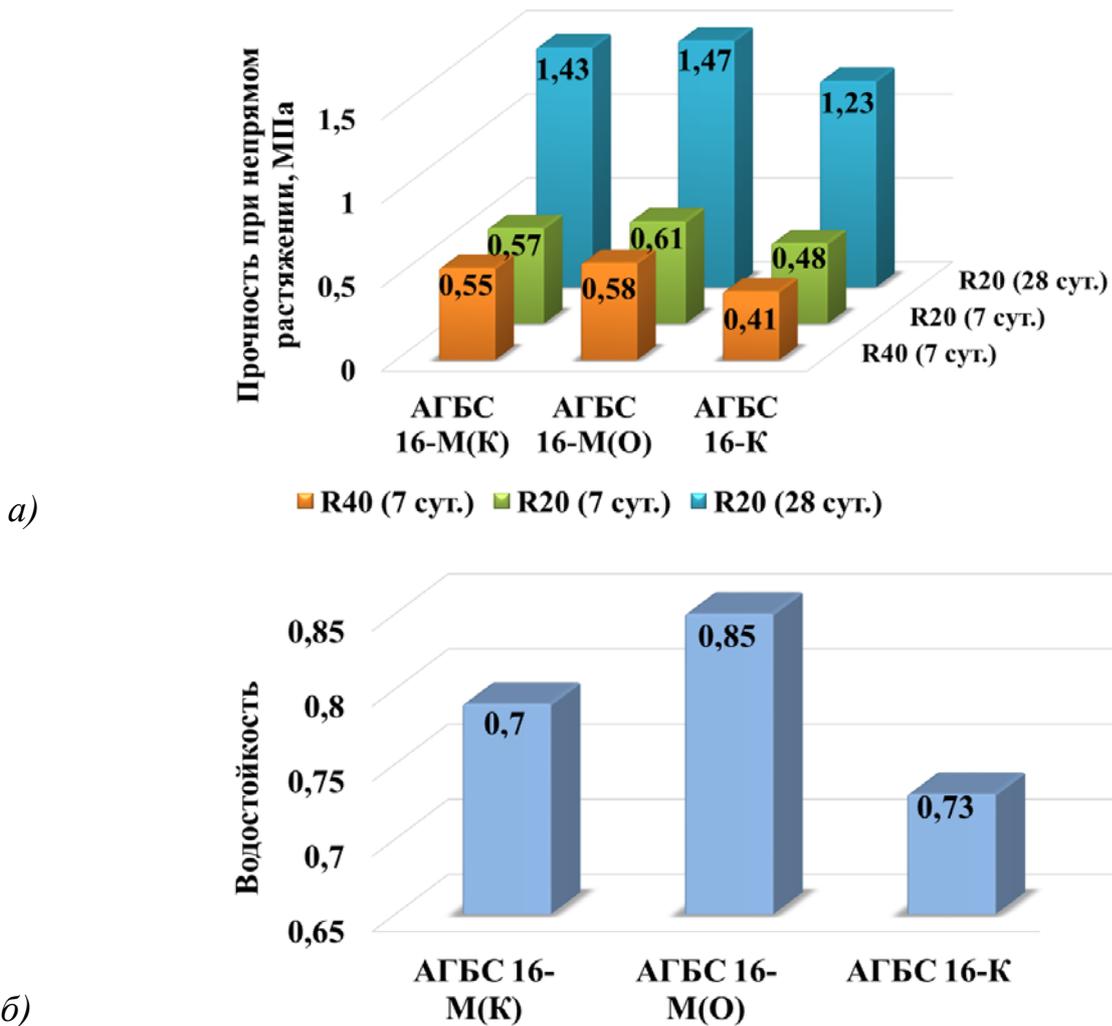
Таким образом, в результате получают полужесткие композиционные материалы способные выдерживать большие нагрузки, чем асфальтобетон, при этом обеспечивающие экономию дорогостоящего традиционного сырья и обладающие высокими физико-механическими характеристиками.

В результате экспериментальных исследований были получены составы асфальтогранулобетонов, обладающие следующими физико-механическими характеристиками в соответствии с ГОСТ Р 70197.1–2022 и ОДМ 218.6.1.005-2021 (таблица 4.10, рисунок 4.4).

**Таблица 4.10** – Физико-механические характеристика составов асфальтогранулобетона с использованием различных типов вяжущих и зол-уноса

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>22</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



**Рисунок 4.4** – Физико-механические показатели составов асфальтогранулобетонов: *a* – прочностные; *б* – устойчивость к воздействию воды

Из таблицы 4.10 видно, что полученные составы асфальтогранулобетона могут быть успешно применены как в слоях покрытий, так и в слоях оснований автомобильных дорог обеспечивая общий запас прочности конструкций автомобильных дорог. Обращают на себя внимание показатели водостойкости составов с использованием лишь минерального вяжущего – АГБС 16-М(К) и АГБС 16-М(О). По сравнению с водостойкостью состава АГБС 16-К они выше на 34 % и 39 %, что обусловлено комплексной работой битумных пленок в составе асфальтогранулобетона и формированием равномерной плотной структуры цементного камня. Однако не смотря на показатель водостойкости образцов состава АГБС 16-К, он все же

выше минимально допустимого значения. Так не смотря на комплексное использование вяжущих в сочетании с добавкой, наличие в составе состаренного битума не может быть в полной мере скомпенсировано битумной эмульсией.

В этой связи, так же наблюдается большая жесткость образцов состава АГБС 16-К, о чем свидетельствуют сниженные в среднем на 14 и 20 %, соответственно, прочностные показатели по сравнению с образцами составов АГБС 16-М(К) и АГБС 16-М(О).

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 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.

Таким образом, на основании комплекса проведенных физико- механических испытаний в соответствии с отраслевым документом установлено, что все разработанные составы на основе вторичного сырья с применением различных вяжущих в сочетании с добавками из техногенного сырья в виде зол-уноса, несмотря на некоторые колебания при переходе от состава к составу, обладают высокими физико-механическими свойствами, в связи с чем могут быть рекомендованы как для устройства оснований автомобильных дорог, так и для покрытий. Однако, для установления оптимальной толщины слоев из асфальтогранулобетона и обеспечения высокого запаса прочности, а также для установления их функционального назна-

чения в конструкции, следует проанализировать условия эксплуатации автомобильных, включающие интенсивность движения автотранспорта, грузонапряженность и влияние погодных-климатических факторов.

#### **4.3 Расчет конструкций дорожных одежд с использованием разработанных составов асфальтогранулобетона**

С целью обоснования целесообразности и эффективности применения асфальтогранулобетона в качестве различных функциональных слоев конструкции автомобильной дороги произведен сравнительный расчет конструкций вариантов равнопрочных автомобильных дорог: с использованием традиционного сырья; с использованием разработанного асфальтогранулобетона в основании автодороги (слой щебеночно-песчаной смеси заменяется на асфальтогранулобетон); с использованием разработанного асфальтогранулобетона в покрытии автомобильной дороги (слой асфальтобетона плотного горячего на битуме БНД 70/100 типа Б, марки II заменяется на асфальтогранулобетон). Согласно ГОСТ Р 71404–2024 автомобильные дороги Белгородской области преимущественно относятся к III и IV техническим категориям, что обеспечивает движение транспорта средней и малой интенсивности на объектах регионального и межмуниципального значения в пределах региона. Таким образом, расчет конструкций в рамках исследования выполнен для дорог, соответствующих требованиям III и IV технической категории.

На основе представленных данных (таблица 4.11–4.14) произведен автоматизированный расчет с использованием лицензионного программного обеспечения «CREDO RADON» с автоматическим изменением данных для соблюдения требуемых критериев.

На основании произведенного расчета (приложение Б) определены толщины каждого слоя конструкций дорожных одежд, из которых складывается общая толщина конструкции, обеспечивающая модуль упругости и запас прочности конечной конструкции (рисунок 4.5, 4.6).

**Таблица 4.11** – Климатические характеристики

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Дорожно-климатическая зона	3
3	Схема увлажнения рабочего слоя	1
4	Регион	Центральный
5	Рельеф района	Равнинный
6	Количество расчетных дней в году, дней	135
7	Номер изолинии границы термического сопротивления дорожной одежды	III
8	Глубина промерзания грунта, см	100
9	Среднегодовая температура, градусы	7,7

**Таблица 4.12** – Общие данные о дороге

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Категория дороги	III
2	Количество полос движения	2
3	Номер расчетной полосы	1
4	Тип конструкции дорожной одежды	Капитальный
5	Срок службы покрытия, лет	14
6	Коэффициент надежности	0,90
7	Поперечный профиль дороги	Двускатный
8	Ширина полосы движения, м	7
9	Ширина обочины, м	2
10	Ширина укрепленной части обочины, м	0,50
11	Заложение откоса, 1:m	1:4
12	Высота насыпи, м	1,10
13	Грунт рабочего слоя	Суглинок легкий Песчанистый
14	Коэффициент уплотнения	0,98
15	Расчетная влажность грунта, доли ед.	Вычислена по методике: 0,71
16	Частичная замена грунта	Не предусмотрена

**Таблица 4.13** – Расчетная нагрузка

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Вид расчетной нагрузки	Динамическая
2	Тип колеса	Двухбаллонное
3	Нормативная статическая нагрузка на ось, $Q_{\text{расч.ось}}$ , кН	140,00
4	Давление в шинах $p$ , Мпа	0,60
5	Диаметр штампа $D$ , см	37,00

**Таблица 4.14** – Состав автомобильного потока

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Состав движения	Неизвестен
2	Коэффициент роста интенсивности, доли ед.	1,020
3	Расчетное суточное число приложений приведенной нагрузки на исходный год службы, авт/сут.	147
4	Расчетное суточное число приложений на полосу приведенной нагрузки на последний год службы, авт/сут.	105
5	Суммарное расчетное число приложений на полосу за весь срок службы, авт.	186599
6	Требуемый модуль упругости, МПа	200

В результате расчета конструкции автомобильной дороги III технической категории при замене 12 см слоя основания из щебеночно-песчаной смеси обеспечивается снижение общей толщины конструкции на 9 см. При этом обеспечивается больший запас прочности конструкции (на 10 %, рисунок 4.5).

Расчет конструкции автомобильной дороги IV технической категории показал, что применение асфальтогранулобетона взамен слоя покрытия из асфальтобетона позволяет снизить общую толщину конструкции лишь на 3 см. При этом обеспечивается несколько сниженный коэффициент запаса прочности (на 15 %) по сравнению с традиционной конструкцией.



а)

\*В расчёте исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.



б)

\*В расчёте исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.

**Рисунок 4.5** – Равнопрочные варианты конструкции автомобильной дороги III технической категории: а – традиционная конструкция; б – конструкция с использованием АГБ для частичной замены слоя из щебеночно-песчаной смеси



a)

E, C, R - МПа; F - град.



б)

E, C, R - МПа; F - град.

**Рисунок 4.6** – Равнопрочные варианты конструкции автомобильной дороги IV технической категории: *a* – традиционная конструкция; *б* – конструкция с использованием АГБ для замены слоя из асфальтобетона

Однако в соответствии с ГОСТ Р 71404–2024 оба варианта применения разработанных составов асфальтогранулобетона позволяют достигнуть коэффициента превышающего минимально допустимые значения как для конструкции III технической категории капитального типа, так и для конструкции IV технической категории облегченного типа.

Таким образом, практическое применение разработанных составов асфальтогранулобетона, предусматривающих применение вторичного и техногенного сырья и способствующих замене традиционного сырья для устройства функциональных слоев различных типов конструкций и технических категорий, позволит обеспечить требуемый коэффициент запаса прочности конструкции при снижении общей толщины конструкции. Наряду с обеспечением требуемой надежности предлагаемых решений будет достигаться значительный экономический эффект.

#### 4.4 Выводы

1. На основании анализа полученных в результате математического моделирования данных произведена оценка целесообразности и эффективности дозировок вяжущих, добавки в виде зол-уноса различных типов и воды. В результате установлено, что наиболее рациональным решением с позиции достижения экстремальных значений требуемых параметров, позволяющих использовать композиционные материалы являются составы: для асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-М(К) – 3 % цемента, 25 % кислой золы-уноса, 50 % -воды; для асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-М(О) – 3% цемента, 15 % основной золы-уноса, 50 % воды; для асфальтогранулобетонной смеси АГБС 16-К – 3 % цемента; 25 % кислой золы-уноса; 3 % битумной эмульсии.

2. С учетом комплекса проведенных физико- механических испытаний в соответствии с отраслевым документом установлено, что все разработанные составы на основе вторичного сырья с применением различных вяжущих в сочетании с добавками из техногенного сырья в виде зол-уноса, несмотря на некоторые колебания при переходе от состава к составу, обладают высокими физико-механическими

свойствами, в связи с чем могут быть рекомендованы как для устройства оснований автомобильных дорог, так и для покрытий. Однако, для установления оптимальной толщины слоев из асфальтогранулобетона и обеспечения высокого запаса прочности, а также для установления их функционального назначения в конструкции, следует проанализировать условия эксплуатации автомобильных, включающие интенсивность движения автотранспорта, грузонапряженность и влияние погодноклиматических факторов.

3. Практическое применение разработанных составов асфальтогранулобетона, предусматривающих применение вторичного и техногенного сырья и способствующих замене традиционного сырья для устройства функциональных слоев различных типов конструкций и технических категорий, позволит обеспечить требуемый коэффициент запаса прочности конструкции при снижении общей толщины конструкции. Наряду с обеспечением требуемой надежности предлагаемых решений будет достигаться значительный экономический эффект.

## 5 ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ГРАНУЛЯТА И ЗОЛ-УНОСА

### 5.1 Технологические особенности производства и применения асфальтогранулобетона при устройстве дорожных одежд

Получение асфальтогранулобетона основано на регенерации асфальтобетона, суть которой заключается в повторном применении измельченного изношенного покрытия в виде крупного заполнителя и введение в состав новых структурных сырьевых материалов, органических (битум, битумная эмульсия) и неорганических (цемент, известь, зола-уноса) вяжущих.

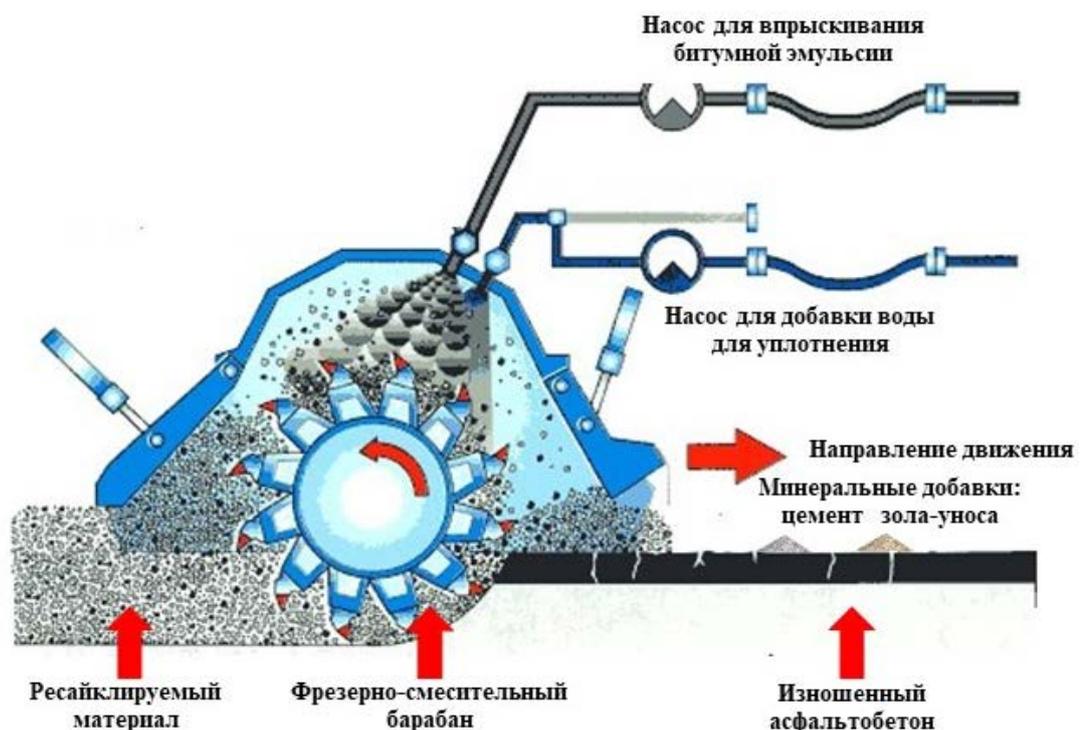
Ранее в работе (см. главу 1) была рассмотрена возможность производства асфальтогранулобетона, предусматривающая применение холодной или горячей регенерации асфальтобетона, и в зависимости от особенностей технологии и условий эксплуатации регенерация может выполняться как на месте, так и на заводе (рисунок 5.1).



**Рисунок 5.1** – Цикличность работ при регенерации асфальтобетона  
в зависимости от применяемой технологии

Следует отметить, что при выборе метода регенерации асфальтобетона с учетом состава разработанного АГБ содержащего золу-уноса, выполняющую функцию регулятора структурообразования, рекомендуется применение холодной регенерации. Также при введении в смесь зол-уноса следует учитывать их химический состав (высококальциевые, низкокальциевые), тип активности (инертные, скрыто активные, активные) и удельную поверхность. Так, низкокальциевые золы-уноса обладают большей пуццолановой активностью и увеличенными сроками схватывания – это позволяет применять их при холодной регенерации на заводе, тогда как высококальциевые золы-уноса возможно применять только при холодной регенерации на месте за счет содержания в составе высокого количества оксида кальция и клинкерных минералов, которые существенно уменьшают сроки схватывания (не более 90 мин.).

*Холодная регенерация на месте*, как правило, предусматривает применение современного оборудования – ресайклера, основным элементом которого является фрезерный барабан с резцами, вращающимися против направления движения машины, которые разрушают и измельчают регенерируемый слой (рисунок 5.2).



**Рисунок 5.2** – Работа фрезы при холодной регенерации слоя на месте

В зависимости от категории автомобильной дороги при холодной регенерации на месте производится совместное фрезерование и перемешивание с дополнительными компонентами, количество которых точно дозируется насосами с микропроцессорным управлением, либо последовательные этапы фрезерования и перемешивания материалов. В состав смеси в процессе фрезерования при необходимости вводят традиционные сырьевые материалы щебень и песок, обеспечивающие повышение физико-механических свойств и устойчивости покрытия к нагрузкам, однако получение разработанных составов асфальтогранулобетона с применением зол-уноса исключает этот этап.

В качестве минеральных компонентов с учетом типа асфальтогранулобетона предусматривается введение цемента, предварительно смешанного с установленным количеством добавки в виде золы-уноса (25 % в случае с кислыми, 15 % в случае с основными). Предварительное смешение компонентов позволяет избежать превышение погрешностей в составе, связанных с влиянием внешних факторов таких как точность дозирования и равномерность распределения, так как при производстве работ на объекте нередким явлением является ветер. Минеральные материалы распределяют в процессе фрезерования слоя (наиболее предпочтительный вариант, позволяющий равномерно смешивать компоненты по всей толщине регенерируемого слоя, рисунок 5.2), либо допускается распределение по старому покрытию с применением дозирующего механизма перед проходом фрезы (определяется технологической оснащенностью предприятия по производству работ, в частности при отсутствии ресайклера, рисунок 5.3).

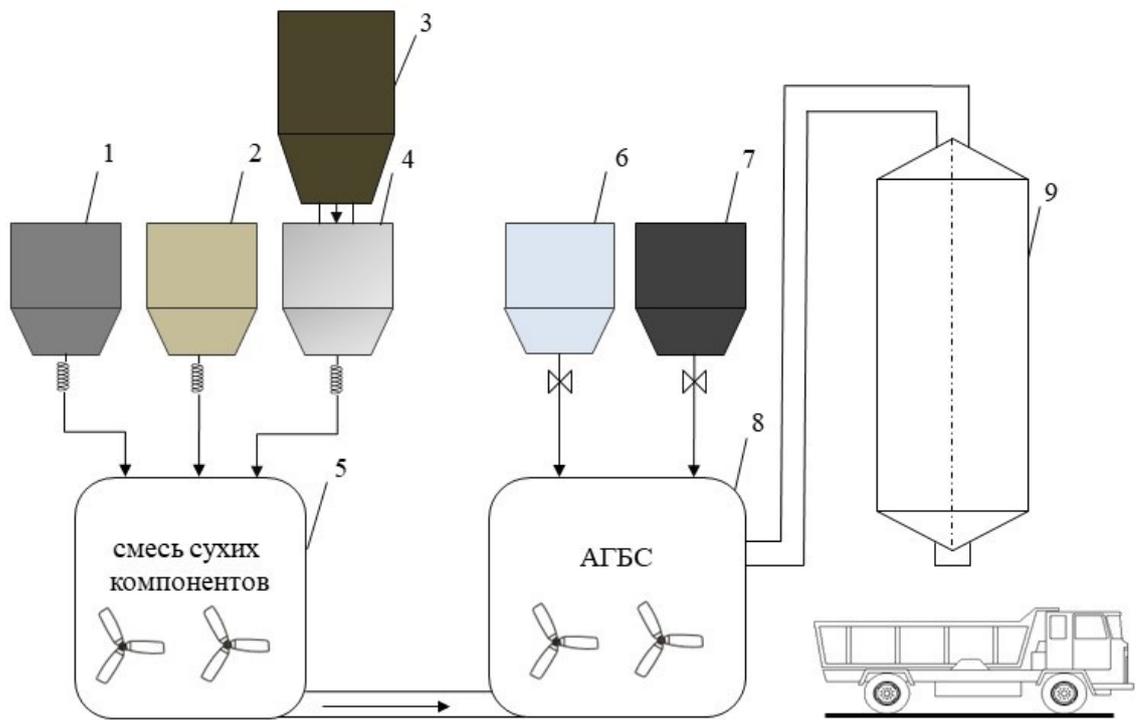
Так же в зависимости от типа асфальтогранулобетона предусматривается введение органического вяжущего. Традиционно по технологии регенерации существует два варианта – вспененный битум или битумная эмульсия. В случае с асфальтогранулобетонными смесями, содержащими золы-уноса, рекомендуется использование битумной эмульсии, что снижает ресурсо- и энергозатратность процесса, а также не требует жесткого регулирования естественной влажности минеральных компонентов.



**Рисунок 5.3** – Последовательность механизмов при осуществлении работ без ресайклера

*Холодную регенерацию на заводе* осуществляют с помощью традиционных смесительных установок асфальтобетонных заводов [158]. Сначала старое покрытие фрезеруется (оптимальное измельчение) или снимается с помощью ударно-отбойных инструментов (является грубым измельчением, требует дополнительной обработки на заводе с помощью грохота) и отправляется для хранения и дальнейшего использования на завод. Затем при получении органоминеральных смесей или асфальтогранулобетонов асфальтовый гранулят смешивают со всеми необходимыми компонентами, определенными рецептурой для достижения требуемых физико-механических и эксплуатационных параметров в соответствии с категорией ремонтируемой, реконструируемой или строящейся автодороги. Полученная смесь транспортируется на место укладки, при этом в зависимости от применяемого вяжущего или их комплекса, а также добавок следует строго соблюдать временные рамки. Так, при использовании основных зол-уноса, необходимо что бы операции по транспортировке и укладке осуществлялись до истечения 90 минут с момента отгрузки смеси, что связано с ускорением сроков схватывания цемента в присутствии таких добавок. На рисунке 5.4 представлен технологический цикл

производства асфальтогранулобетонной смеси (АГБС) с содержанием неорганического вяжущего (портландцемента) и зол-уноса с возможностью подачи битумной эмульсии для получения комплексной асфальтогранулобетонной смеси (АГБС-К). В отличие от технологии регенерации непосредственно на дороге в данном случае не требуется предварительное смешение цементного вяжущего с добавкой, так как все сухие компоненты попадают в один смесительный узел без потерь за счет отсутствия влияния внешних факторов.



**Рисунок 5.4** – Технологический цикл производства АГБС на заводе:

1 – весовой бункер-дозатор для портландцемента; 2 – весовой бункер-дозатор для золы-уноса; 3 – склад асфальтогранулята; 4 – весовой бункер-дозатор для асфальтогранулята; 5 – смеситель сухих компонентов смеси; 6 – объёмный бункер-дозатор для воды; 7 – объёмный бункер-дозатор для битумной эмульсии; 8 – смеситель асфальтогранулобетонной смеси; 9 – силос

Следует отметить, что четкое дозирование компонентов и их равномерное распределение в составе оптимально-подобранной смеси обеспечивает получение однородной конденсационно-кристаллизационной структуры прочного, водостойкого асфальтогранулобетона.

После смешения готовую смесь выгружают в накопительные силосы для дальнейшего дозирования и транспортирования самосвалами на объект, где происходит распределение смеси посредством асфальтоукладчика и уплотнение катками. Таким образом, технология устройства слоя из асфальтогранулобетона не имеет принципиальных отличий от традиционно-применяемой на сегодняшний день технологии устройства слоя из асфальтобетона.



**Рисунок 5.5** – Технология устройства слоя из асфальтогранулобетона

В целом процесс регенерации асфальтобетонных покрытий при получении асфальтогранулобетонных смесей с использованием зол-уноса не отличается от получения традиционных АГБС и согласно [64] включает следующие технологические операции:

- фрезерование существующего покрытия на требуемую глубину;
- перемешивание АГ с введением вяжущего и других компонентов в случае необходимости;
- профилирование и окончательное уплотнение асфальтогранулобетонной смеси.

Таким образом, анализ технологических особенностей регенерации асфальтобетонных покрытий позволил установить, что независимо от способа холодной

регенерации (на заводе/на дороге) при использовании зол-уноса необходимо учитывать их особенности, процентное содержание в общей массе смеси и возможное влияние внешних факторов на технологический процесс. В результате выявлены ключевые особенности организации технологических операций при использовании в составе асфальтогранулобетона техногенного сырья в виде зол-уноса, заключающиеся в предварительном смешении минерального вяжущего (цемента) с добавкой (золой-уноса) с целью снижения погрешностей при распределении сухих компонентов и достижения равномерности смеси.

## **5.2 Экономическая эффективность применения разработанных составов асфальтогранулобетона**

Расчет стоимостных показателей применения разработанных в рамках диссертационного исследования составов асфальтогранулобетона с учетом предлагаемых конструктивных решений для автомобильных дорог различных технических категорий и типов является одним из критериев целесообразности и эффективности.

Методологической основой для анализа экономической эффективности являлся алгоритм расчета сметной стоимости строительства с учетом территориальных единичных расценок на строительные и специальные работы для Белгородской области ТЕР-2001 Часть 27 «Автомобильные дороги», а также индексов изменения сметной стоимости по элементам прямых затрат по объектам строительства на III квартал 2025 года. Расценки на материалы взяты из коммерческих предложений, предоставленных ОГКУ «УпрДорТранс Белгородской области». Расценки на конечный композиционный материал, предлагаемый заменой ряда конструктивных слоев, взяты из результатов анализа их сырьевой стоимости, отраженного в таблицах 5.1–5.3, для составов АГБС-16 М на основе минерального вяжущего с использованием как кислой, так и основной зол-уноса, а также АГБС-16 К. Сырьевая стоимость компонентов всех вариантов приведена, на основании цен, представленных в электронных каталогах поставщиков сырья, размещенных в электронных базах данных доступных отраслевым предприятиям (дата обращения: 14.05.2025 г.).

**Таблица 5.1** – Вариант 1: АГБС-16 М(К)

<b>Наименование компонента</b>	<b>Кол-во, кг</b>	<b>Условная цена, руб./кг</b>	<b>Стоимость, руб.</b>
Асфальтогранулят	1417	0,15	<b>212,55</b>
Цемент	31	8	<b>248,00</b>
ЗУ Кемеровской ГРЭС	12	1,5	<b>18,00</b>
Вода	20	0,05	<b>1,00</b>
<b>Итого:</b>			<b>479,55</b>

**Таблица 5.2** – Вариант 2: АГБС-16 М(О)

<b>Наименование компонента</b>	<b>Кол-во, кг</b>	<b>Условная цена, руб./кг</b>	<b>Стоимость, руб.</b>
Асфальтогранулят	1417	0,15	<b>212,55</b>
Цемент	36	8	<b>288,00</b>
ЗУ Назаровской ТЭС	6	1,5	<b>9,00</b>
Вода	21	0,05	<b>1,05</b>
<b>Итого:</b>			<b>510,60</b>

**Таблица 5.3** – Вариант 3: АГБС-К (с битумной эмульсией)

<b>Наименование компонента</b>	<b>Кол-во, кг</b>	<b>Условная цена, руб./кг</b>	<b>Стоимость, руб.</b>
АГ	1394	0,15	<b>209,10</b>
Цемент	35	8	<b>280,00</b>
Битумная эмульсия	42	35	<b>1 470,00</b>
Зола-уноса	9	1,5	<b>13,50</b>
<b>Итого:</b>			<b>1 972,60</b>

В таблицах 5.4–5.7 представлены результаты сравнительного анализа сметной стоимости материалов для традиционных конструкций нежестких дорожных одежд III и IV категории капитального и облегченного типов соответственно и

условно равнопрочных конструкций, в которых часть традиционных слоев заменена вариантами составов АГБ. Стоимость суммарного объема материалов, требуемых для устройства 1 километра автомобильной дороги с нормативной шириной проезжей части (для автомобильных дорог III категории капитального типа – 7 метров, для IV категории облегченного типа – 6 метров), без учета обочин, а также других элементов поперечного профиля, выходящих за границы проезжей части ввиду отсутствия изменений при замене конструктивных слоев разработанным композитом. Следует отметить, что в рамках представленных данных отражена стоимость материалов без учета фонда оплаты труда и стоимости работы машин и механизмов.

В результате проведенного анализа экономической эффективности предлагаемых технологических решений установлено, что стоимость материалов конструкции дорожной одежды III технической категории с применением АГБС-16 М(О) ниже стоимости традиционной нежесткой конструкции одежды автомобильной дороги на 5795305,71 рублей, что соответствует 14,74 % от стоимости традиционной конструкции. В свою очередь, стоимость материалов конструкции дорожной одежды IV технической категории с применением АГБС-16 К ниже стоимости традиционной дорожной одежды на 7653472,42 рублей, что соответствует 38,17 % от стоимости традиционной конструкции при соблюдении требований нормативной документации. Таким образом, расчетные данные позволяют сделать вывод о экономической целесообразности и эффективности применения разработанного композита, в перспективе обеспечивающего заданную эксплуатационную надежность конструкции в целом.

### **5.3 Апробация и внедрение результатов исследований**

Для внедрения результатов работы разработаны следующие нормативные документы:

1. Рекомендации по использованию асфальтогранулобетонных смесей с применением зол-уноса (Приложение Б);

**Таблица 5.4** – Расчет стоимости традиционной нежесткой конструкции автомобильной дороги III технической категории

Расчет стоимости традиционной нежесткой конструкции ДО автомобильной дороги III кат.									
Материал	Длина, м	Ши- рина, м	Толщина, см	Цена, Р/т	Масса, т	Объём, м³	Стоимость, Р	Цена, Р/м²	Примечания
ЩМА-16 (Щебёночно-ма- стичный асфальтобетон)	1000,00	7,00	5,00	7850,00	840,00	350,00	6594000,00		
Асфальтобетон А22Нн	1000,00	7,00	7,00	6700,00	1225,00	490,00	8207500,00		
Асфальтобетон А32От	1000,00	7,00	10,00	6600,00	1750,00	700,00	11550000,00		
ЩПС 0-63	1000,00	7,00	38,00	1915,00	5320,00	2660,00	10187800,00		
Песок очень мелкий	1000,00	7,00	30,00	600,00	3570,00	2100,00	2142000,00		
Геокомпозит Армостаб- Грунт Д 50/50	1000,00	7,00	-		-	-	630000,00	90,00	На основе КП
<b>ИТОГО:</b>					<b>12705,00</b>	<b>6300,00</b>	<b>39311300,00</b>		

**Таблица 5.5** – Расчет стоимости равнопрочной конструкции автомобильной дороги III категории с применением АГБС-16 М(О)

Расчет стоимости конструкции ДО автомобильной дороги III категории с применением АГБС-16 М(О)									
Материал	Длина, м	Ши- рина, м	Тол- щина, см	Цена, Р/т	Масса, т	Объём, м³	Стоимость, Р	Цена, Р/м²	Примечания
ЩМА-16 (Щебёночно-мастич- ный асфальтобетон)	1000,00	7,00	5	7850,00	840,00	350,00	6594000,00		
Асфальтобетон А22Нн	1000,00	7,00	7	6700,00	1225,00	490,00	8207500,00		

Расчет стоимости конструкции ДО автомобильной дороги III категории с применением АГБС-16 М(О)									
Материал	Длина, м	Ши- рина, м	Тол- щина, см	Цена, Р/т	Масса, т	Объём, м³	Стоимость, Р	Цена, Р/м²	Примечания
Асфальтобетон А32От	1000,00	7,00	8	6600,00	1400,00	560,00	9240000,00		
АГБС-16 М(О)	1000,00	7,00	12	344,59	1243,20	840,00	428394,29		Индивидуаль- ный расчет
ЩПС 0-63	1000,00	7,00	25	1915,00	3500,00	1750,00	6702500,00		
Песок очень мелкий	1000,00	7,00	24	600,00	2856,00	1680,00	1713600,00		
Геокомпозит Армостаб-Грунт Д 50/50	1000,00	7,00	-		-	-	630000,00	90,00	На основе КП
<b>ИТОГО:</b>					<b>11333,00</b>	<b>5670,00</b>	<b>33515994,29</b>		
<b>Экономия с АГБС-МО, Р</b>		<b>в % от традиционной</b>							
<b>-5795305,71</b>		<b>-14,74208615</b>							

Таблица 5.6 – Расчет стоимости традиционной нежесткой конструкции автомобильной дороги IV категории

Расчет стоимости традиционной нежесткой конструкции ДО автомобильной дороги IV категории									
Материал	Длина, м	Ши- рина, м	Толщина, см	Цена, Р/т	Масса, т	Объём, м³	Стоимость, Р	Цена, Р/м²	Примечания
Покрытие НоваЧип	1000,00	6,00	1,50	7200,00	220,80	90,00	1589760,00		
Асфальтобетон А16Вл	1000,00	6,00	6,00	7200,00	900,00	360,00	6480000,00		
ЩПС 0-63	1000,00	6,00	40,00	1915,00	4800,00	2400,00	9192000,00		

Расчет стоимости традиционной нежесткой конструкции ДО автомобильной дороги IV категории									
Материал	Длина, м	Ши- рина, м	Толщина, см	Цена, Р/т	Масса, т	Объём, м³	Стоимость, Р	Цена, Р/м²	Примечания
Геокомпозит Армостаб- Грунт D 50/50	1000,00	6,00					1200000,00	200,00	На основе КП
Песок очень мелкий	1000,00	6,00	26,00	600,00	2652,00	1560,00	1591200,00		
<b>ИТОГО:</b>					<b>8572,80</b>	<b>4410,00</b>	<b>20052960,00</b>		

Таблица 5.7 – Расчет стоимости конструкции автомобильной дороги IV категории с применением АГБС-16 (К)

Расчет стоимости традиционной нежесткой конструкции ДО автомобильной дороги IV категории									
Материал	Длина, м	Ши- рина, м	Тол- щина, см	Цена, Р/т	Масса, т	Объём, м³	Стоимость, Р	Цена, Р/м²	Примечания
Покрытие НоваЧип	1000,00	6,00	1,50	7200,00	220,80	90,00	1742400,00		
Асфальтобетон А16Вл	1000,00	6,00	6,00	7200,00	900,00	360,00	6480000,00		
ЩПС 0-63	1000,00	6,00	40,00	2700,00	4800,00	2400,00	12960000,00		
Геокомпозит Армостаб- Грунт D 50/50	1000,00	6,00					1200000,00	200,00	На основе КП
Песок очень мелкий	1000,00	6,00	26,00	500,00	2652,00	1560,00	1326000,00		
<b>ИТОГО:</b>					<b>8572,80</b>	<b>4410,00</b>	<b>23708400,00</b>		
<b>Экономия с АГБС-К, Р</b>		<b>в % от традиционной</b>							
<b>-7653472,42</b>		<b>-38,16629772</b>							

2. Стандарт организации СТО 02066339-083-2025 «Асфальтогранулобетонные смеси с применением техногенного сырья в виде зол-уноса. Технические условия» (Приложение В);

3. Технологический регламент на получение асфальтогранулобетонных смесей с использованием зол-уноса (Приложение Г).

На основании комплекса проведенных исследований подписан протокол о намерениях с ООО «Герба» об использовании результатов по разработке асфальтогранулобетона на основе асфальтобетонного гранулята с применением зол-уноса при реконструкции/капитальном ремонте/строительстве новых участков автомобильных дорог в Белгородской области согласно разработанным нормативным документам (Приложение Д).

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги и аэродромы», «Экспертиза и технологии перспективных материалов»; магистров направлений 08.04.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги» и «Дорожно-строительные материалы и технологии»; специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатация и техническое прикрытие автомобильных дорог» (Приложение Е).

## 5.4 Выводы

1. Произведен анализ технологических особенностей регенерации асфальтобетонных покрытий позволил установить, что независимо от способа холодной регенерации (на заводе/на дороге) при использовании зол-уноса необходимо учитывать их особенности, процентное содержание в общей массе смеси и возможное влияние внешних факторов на технологический процесс. В результате выявлены ключевые особенности организации технологических операций при использовании в составе асфальтогранулобетона техногенного сырья в виде зол-уноса, заключающиеся в предварительном смешении минерального вяжущего (цемента) с добавкой

(золой-уноса) с целью снижения погрешностей при распределении сухих компонентов и достижения равномерности смеси.

2. В результате проведенного анализа экономической эффективности предлагаемых технологических решений установлено, что стоимость материалов конструкции дорожной одежды III технической категории с применением АГБС-16 М(О) ниже стоимости традиционной нежесткой конструкции одежды автомобильной дороги на 5795305,71 рублей, что соответствует 14,74 % от стоимости традиционной конструкции. В свою очередь, стоимость материалов конструкции дорожной одежды IV технической категории с применением АГБС-16 К ниже стоимости традиционной дорожной одежды на 7653472,42 рублей, что соответствует 38,17 % от стоимости традиционной конструкции при соблюдении требований нормативной документации. Таким образом, расчетные данные позволяют сделать вывод о экономической целесообразности и эффективности применения разработанного композита, в перспективе обеспечивающего заданную эксплуатационную надежность конструкции в целом.

3. Для внедрения результатов работы разработаны следующие нормативные документы: рекомендации по использованию асфальтогранулобетонных смесей с применением зол-уноса; стандарт организации СТО 02066339-083-2025 «Асфальтогранулобетонные смеси с применением техногенного сырья в виде зол-уноса. Технические условия»; технологический регламент на получение асфальтогранулобетонных смесей с использованием зол-уноса.

4. Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги и аэродромы», «Экспертиза и технологии перспективных материалов»; магистров направлений 08.04.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги» и «Дорожно-строительные материалы и технологии»; специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатация и техническое прикрытие автомобильных дорог».

## 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. О недрах: Федеральный закон № 2395–1: [принят Государственной думой 21 февраля 1992 года: одобрен Советом Федерации 22 декабря 2023 года]. – Москва: Дом Советов России, 1992. – 83 с.
2. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727294161>.
3. Реестр новых и наилучших технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosdornii.ru/proekty/rnnt/>.
4. Золошлаковые отходы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://peretok.ru/infographics/699/12662/>.
5. *Горельшев, Н.В.* Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы: учебное пособие / Н.В. Горельшев. – М.: Можайск – Терра, 1995. – 176 с.
6. *Щепетева, Л.С.* Устойчивость асфальтобетона к колееобразованию / Л.С. Щепетева, Д.А. Агапитов, К.Ю. Тюрюханов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2016. – Т. 1. – С. 319–323.
7. *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 // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 1547–1550.
8. *Колесник, Д.А.* Проектирование высококонтактного асфальтобетона / Д.А. Колесник, Д.В. Пахаренко // Мир дорог. – 2021. – № 135. – С. 84–90.
9. *Батракова, В.П.* Особенности применения, технологии приготовления и укладки щебёночно-мастичного асфальтобетона / В.П. Батракова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – № 47. – С. 59–62.
10. *Павлова, Л.Н.* Применение щебёночно-мастичного асфальтобетона и его принципиальные отличия от других видов асфальтобетонов / Л.Н. Павлова,

А.А. Шмелев // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 98. – С. 153–156.

11. *Аксинович, Е.В.* Применение гравийного асфальтобетона / Е.В. Аксинович. – М.: Автотрансиздат, 1955. – 64 с.

12. *Проваторова, Г.В.* Дорожно-строительные материалы: курс лекций по дисциплинам «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов», «Дорожно-строительные материалы» 3 часть / Г.В. Проваторова // Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во гос. ун-та, 2015. – 92 с.

13. *Александров, Д.Ю.* Перспективы применения комплексно-модифицированного песчаного асфальтобетона в дорожном строительстве / Д.Ю. Александров // Наука и техника. – 2017. – Т. 16. – № 4. – С. 315–323.

14. *Ковалев, Я.Н.* Проблема использования песчаного дорожного асфальтобетона и пути её решения / Я.Н. Ковалев, Д.Ю. Александров // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции. Том 3. – Минск: БНТУ, 2014. – 137 с.

15. *Ковалев, Я.Н.* Концептуальные основы технологии песчаного дисперсно-армированного асфальтобетона / Я.Н. Ковалев, Д.Ю. Александров // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 4. – С. 269–273.

16. *Рябошапка, А.Н.* Асфальтобетон из горячих смесей / А.Н. Рябошапка // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – № 12(141). – С. 25–29.

17. *Калгин, Ю.И.* Структурно-механические свойства модифицированного горячего и теплого дорожного асфальтобетона / Ю.И. Калгин, А. Алшахван, Н.И. Паневин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 3(67). – С. 124–129.

18. *Моисеев, Д.Е.* Асфальтобетон из горячих смесей / Д.Е. Моисеев // Россия молодая: Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Кемерово: КГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 62808.1–62808.4.

19. *Наволокина, С.Н.* Холодный асфальтобетон и добавки для его производства / С.Н. Наволокина // Образование, наука, производство, Белгород, 20–22 октября 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 688–691.
20. *Высоцкая, М.А.* Холодные технологии дорожно-ремонтных работ / М.А. Высоцкая, Е.В. Чевтаева, А.О. Ширяев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 30–34.
21. *Карабаев, А.* Холодный асфальтобетон с добавками комплексных органических вяжущих / А. Карабаев // Транспорт шёлкового пути. – 2019. – № 3–4. – С. 68–76.
22. *Самаров, А.С.* Эффективность применения холодных асфальтобетонов / А.С. Самаров // Вектор научной мысли. – 2024. – № 8(13). – С. 93–94.
23. *Мардиросов, И.В.* Зависимость физико-механических показателей холодных асфальтобетонных смесей от температуры их приготовления / И.В. Мардиросов, С.А. Чернов // Дороги и мосты. – 2011. – № 1(25). – 250 с.
24. *Коротков, Ю.М.* Предпосылки применения крупнозернистых щебеночно-мастичных асфальтобетонов в условиях Кемеровской области / Ю.М. Коротков, С.В. Богомолов // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2017. – 51004 с.
25. *Мардиросов, И.В.* Анализ требований к горячим крупнозернистым пористым асфальтобетонным смесям / И.В. Мардиросов, С.А. Чернов, Н.И. Ширяев, Ю.В. Майор // Дороги и мосты. – 2014. – № 2(32). – С. 273–282.
26. *Васильченко, Е.А.* Общие сведения об асфальтобетонной смеси / Е.А. Васильченко, И.С. Рязанова, А.Р. Сысоев [и др.] // Вестник науки и образования. – 2022. – № 5 (125). – С. 66–69.
27. *Тимофеев, С.А.* Исследование свойств плотных и пористых асфальтобетонов по отечественной и европейской методикам / С.А. Тимофеев, С.Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2014. – № 2. – С. 52–56.

28. *Тимофеев, С.А.* Плотные и пористые асфальтобетоны / С.А. Тимофеев // Мир дорог. – 2017. – № 100. – С. 55–57.
29. *Шайхуллин, И.Р.* Пористый асфальтобетон / И.Р. Шайхуллин, П.А. Максимов // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Стерлитамак: Издательство «Нефтегазовое дело», 2016. – С. 227–228.
30. *Горельшев, Н.В.* Методические рекомендации по применению высокопористого асфальтобетона с уменьшенным расходом битума в конструкциях дорожных одежд / Н.В. Горельшев, К.Я. Лобзова, Л.А. Марков и др. – М.: Союздорнии, 1978. – 30 с.
31. Методические рекомендации по устройству верхних слоев дорожных покрытий из многощелебенистых асфальтобетонов с повышенной плотностью. – М.: СоюздорНИИ, 1986. – 13 с.
32. *Петров, А.В.* Сравнительный анализ щебеночно-мастичного асфальтобетона и асфальтобетона типа А марки 1 / А.В. Петров, Н.А. Пепеляева // Молодой ученый. – 2022. – № 50(445). – С. 28–30.
33. *Допперт, В.А.* Типы применяемых асфальтобетонных смесей и способы их улучшения / В.А. Допперт // Ресурсосберегающие и экологически перспективные технологии и машины лесного комплекса будущего: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Лесоинженерного факультета Воронежской государственной лесотехнической академии. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2009. – С. 269–273.
34. *Шабуров, С.С.* Технология производства теплой асфальтобетонной смеси на вязком битуме / С.С. Шабуров, В.Ю. Кибирев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 1(54). – С. 173–179.
35. *Телтаев, Б.Б.* Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов / Б.Б. Телтаев // Дорожная техника. – 2010. – С. 130–137.
36. *Дубина, С.И.* Надежность асфальтобетонных покрытий автомобильных

магистралей / С.И. Дубина // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 3(3). – С. 60–63.

37. ГОСТ Р 58406.2–2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. – Введ. 01.06.2020. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 31 с.

38. *Косенко, Н.В.* Обоснование расчётных характеристик асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2–2020 при проектировании дорожных одежд на растяжение при изгибе / Н.В. Косенко // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2022. – №. 2(32). – 4 с.

39. ГОСТ Р 9128–2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – Введ. 01.11.2014. – М.: Российский институт стандартизации, 2019. – 49 с.

40. *Кононович, В.И.* Ошибки при проектировании и разработке проектов ремонта и усиления транспортных сооружений / В.И. Кононович, И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2021. – №. 2. – С. 80–93.

41. *Горячев, М.Г.* Сопоставление дорожных асфальтобетонов, проектируемых по разным государственным стандартам, для обоснования их расчётных характеристик при проектировании дорожных одежд / М.Г. Горячев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 1(64). – С. 85–90.

42. *Смекалов, Н.С.* Совершенствование составов асфальтобетонных смесей при использовании нетрадиционного минерального порошка / Н.С. Смекалов, А.Э. Окутин // Актуальные научные исследования в современном мире: Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, София, 25 декабря 2020 года / под общей редакцией А.И. Вострецова. – Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2020. – С. 63–68.

43. Национальный проект «Безопасные качественные дороги» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bkdrf.ru/Home/Statistics>.

44. *Билай, Л.В.* Регенерация использованного дорожного асфальтового бетона: автореферат дисс. ... канд. техн. науки/ Билай Лия Викторовна – Киев, 1969. – 20 с.
45. *Brown, E.R.* Evaluation of properties of recycled asphalt concrete hot mix. Technical Report / E.R. Brown // International Air Transportation Conference. – 1984. – P. 1599.
46. *Bellin, P.* Qualitätssicherung bei der Wiederverwendung von Asphalt / P. Bellin, F. Rode // Straße und Autobahn. – 1985. – Т. 36. – №. 7. – P. 149–174.
47. *Алиев, А.М.* Регенерация асфальтобетона / А.М. Алиев. – Баку: Азернешр, 1985. – 275 с.
48. *Сюньи, Г.К.* Регенерированный дорожный асфальтобетон / Г.К. Сюньи, К.Х. Усманов, Э.С. Файнберг; Под ред. Г.К. Сюньи. – М.: Транспорт, 1984. – 118 с.
49. *Гезенцвей, Л.Б.* Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов / Л.Б. Гезенцвей. – М.: Стройиздат, 1971. – 256 с.
50. *Бахрах, Г.С.* Регенерация асфальтобетонных слоёв дорожных одежд / Г.С. Бахрах, Г.С. Горлина, А.Я. Эрастов. – М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1981. – 66 с.
51. Патент № 2745501 Российская Федерация. Способ повышения плотности и прочности асфальтогранулобетона [Текст] / Лупанов А.П, Суханов А.С., Гладышев Н.В. [и др.]; заявл. 06.08.2020; опубл. 25.03.2021.
52. *Лупанов, А.П.* Ресурсосберегающие технологии ремонта дорожных покрытий / А.П. Лупанов, В.В. Силкин // Дорожные машины. – 2000. – № 7. – 5–7 с.
53. *Лупанов, А.П.* Холодная переработка старого асфальтобетона в смеси-тельной установке / А.П. Лупанов, А.С. Суханов, М. Аль-Карагули, В.В. Силкин // Дороги и мосты. – 2019. – Вып. 42/2. – С. 183–191.
54. Asphalt in Figures [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>.
55. *Балабанов, В.Б.* Горячая регенерация асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / В.Б. Балабанов, И.В. Щеглачев // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2017. – № 3. – С. 8.

56. *Hand, A.* Cold asphalt and hot in-place asphalt recycling technologies / *A. Hand, T. Aschenbrener* // *Pavement Engineering*. – 2023.

57. *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 международной научно-практической конференции, 13–15 февраля 2024 года.* – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2024. – С. 280–284.

58. *Лупанов, А.П.* Повторное использование асфальтобетона / *А.П. Лупанов, В.В. Силкин, В.В. Рудакова [и др.]* // *СТТ: Строительная техника и технологии*. – 2016. – № 4(120). – С. 76–79.

59. *Прокопец, В.С.* Восстановление асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга и добавками химических веществ / *В.С. Прокопец, С.Ф. Филатов, Т.Л. Иванова, М.В. Тарасова, Л.В. Поморова* // *Башкирский химический журнал*. 2006. – № 5. – С. 61–65.

60. *Nadia, S.* Effect of asphalt modified with waste engine oil on the durability properties of hot asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement / *S. Nadia, J. Hasan R. Al-Rubaei*, // *Open Engineering*. – 2024. – Т. 14. – Vol. 1. – P. 1–17.

61. *Mao, J.* Energy Consumption and Carbon Emission Analysis of Typical Regeneration Methods for Asphalt Pavements / *J. Mao, Y. Zhu, Q. Chen, H. Yu* // *Buildings*. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 6. – P. 1569–1569.

62. *Балабанов, В.Б.* Горячая регенерация асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / *В.Б. Балабанов, И.В. Щеглачев* // *Актуальные проблемы развития строительной отрасли: Материалы Международной научно-практической конференции, Иркутск, 29 июня 2017 года.* – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – С. 14–18.

63. *Маркова, И.Ю.* Технологии регенерации асфальтобетонных покрытий / *И.Ю. Маркова, Д.А. Рулев, М.А. Степаненко* // *Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 ок-*

тября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 34–38.

64. ОДМ 218.6.1.005-2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации – Введ. 17.02.2021. – 29 с.

65. *Al-Karaguli, M.M.* Economic efficiency of road surface construction using the cold technology of recycling the asphalt-concrete in Iraq and Russian Federation / M.M. Al-Karaguli, A.V. Lupanov, V.V. Silkin, B.G. Zumbadze, S. Sarmad // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2021.

66. Wirtgen. Технология холодного ресайклинга, 2012. – 370 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.wirtgen-group.com/media/02\\_wirtgen/05\\_pdfs/praxisratgeber leseproben/manual\\_cold-recycling\\_excerpt\\_ru.pdf](https://www.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/05_pdfs/praxisratgeber leseproben/manual_cold-recycling_excerpt_ru.pdf)

67. *Timm, D.* Cold Central Plant Recycled Asphalt Pavements in High Traffic Applications / D. Timm, B. Diefenderfer, B. Bowers, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2018. – Vol. 2672. – Is. 40.

68. *Kampala, A.* Strength characteristics and mix design of full-depth reclamation of asphalt pavement with cement / A. Kampala, J. Suebsuk, P. Daprom // Construction and Building Materials. – 2024.

69. *Li, Y.* Laboratory Evaluation of Strength Performance of Full-Depth Reclamation with Portland Cement Material / Y. Li, Ch. Luo // Coatings. – 2024. – Vol. 14.

70. *Лях, Н.И.* Техничко-экономическая целесообразность экологизации ремонта автомобильных дорог методом горячего ресайклинга / Н.Д. Остапенко, С.С. Буданов [и др.] // Евразийское пространство: экономика, право, общество. – 2023. – № 8. – С. 17–19.

71. *Ярмолинский, В.А.* Способы горячей регенерации асфальтобетонных покрытий / В.А. Ярмолинский, М.О. Жабкин, Е.В. Ярмолинская // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: Международный сборник научных трудов / Под редакцией А.И. Ярмолинского. Том 18. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2018. – С. 89–95.

72. *Есипова, Ю.Ю.* Современные методы регенерации асфальтобетонов / Ю.Ю. Есипова, А.В. Сачкова, Г.С. Духовный // Современная наука: теоретический и практический взгляд. – 2016. – С. 33–37.

73. *Борисенко, Ю.Г.* Анализ применения технологий ресайклинга дорожных асфальтобетонных покрытий в России и за рубежом / Ю.Г. Борисенко, А.В. Ширяев, В.В. Корниенко // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. – 2023. – № 4. – С. 16–23.

74. *Смирнов, Н.Н.* Способы разборки слоев дорожной одежды для повторного использования материалов / Н.Н. Смирнов // Синергия Наук. – 2019. – № 31. – С. 726–763.

75. *Свириденко, М.В.* Способы регенерации дорожных одежд / М.В. Свириденко, В.С. Федорова // Материалы 57-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ, Хабаровск, 17–27 апреля 2017 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2017. – С. 256–260.

76. *Лабусов, Н.В.* Регенерация асфальтобетона / Н.В. Лабусов, С.В. Белихин, А.А. Грянян, А.Н. Розе // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием / отв. ред. Н.Д. Беляев, В.В. Елистратов. Том Ч. 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. – С. 62–65.

77. *Gao, J.* Effect of Hot Mixing Duration on Blending, Performance, and Environmental Impact of Central Plant Recycled Asphalt Mixture / J. Gao, Y. Yuquan, J. Huang // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – P. 1057.

78. *Левченко, Е.Н.* Техногенное минеральное сырьё: особенности вещественного состава и технологических свойств, геолого-технологическое картирование / Е.Н. Левченко, Л.И. Веремеева, О.Е. Горлова // Руды и металлы. – 2018. – № 1. – С. 64–75.

79. *Ежов, А.И.* Оценка запасов техногенного сырья в Российской Федерации (твёрдые полезные ископаемые) / А.И. Ежов // Горная наука и технологии. –

2016. – № 4. – С. 62–75.

80. *Рулев, Д.А.* Актуальность использования вторичного и техногенного сырья в дорожном строительстве / Д.А. Рулев, М.А. Степаненко, Д.А. Чурсанов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 4. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 169–174.

81. *Лесовик, В.С.* Состояние и перспективы использования техногенного сырья / В.С. Лесовик // БСТ: бюллетень строительной техники. – 2014. – № 7. – С. 59–60.

82. *Майданова, Н.В.* Вторичное использование гранулята старого асфальтобетона в составе асфальтобетонных смесей / Н.В. Майданова, С.А. Шибалов // Дороги России. – 2018. – № 5. – С. 1–8.

83. *Кочеткова, А.В.* Применение асфальтогранулята в технологиях дорожного строительства / А.В. Кочеткова / «Научное творчество молодёжи – лесному комплексу России»: матер. XIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник» / М-во образования и науки РФ, Урал. гос. лесотехн. ун-т, Урал. отделение секции наук о лесе Рос. Акад. естеств. наук, Урал. лесной технопарк. – Екатеринбург, 2017. – С. 180–182.

84. *Бузиков, Ш.В.* Технология рециклинга дорожного покрытия с упрочняющими добавками / Ш.В. Бузиков, В.В. Перехрист // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: Материалы X Международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 155–158.

85. *Андрианов, К.А.* Определение влияния параметров слоя материала из асфальтогранулята при укреплении обочин автомобильных дорог / К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков, П.В. Монастырев, Д.М. Мордасов, С.А. Сенибабнов // Эксперт: теория и практика. – 2023. – №3 (22). – С. 40–45.

86. *Заратина, Л.С.* Влияние свойств материала, получаемого при холодном

фрезеровании покрытий нежесткого типа, на деформацию слоя при устройстве дорожной одежды / Л.С. Зарапина, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – №. 1. – С. 85–95.

87. *Каюмов, А.К.* Основания дорожных одежд из вторичных материалов / А.К. Каюмов, С.И. Зиневич, Я.Н. Ковалев // Наука и техника. – 2022. – Т. 21. – № 6. – С. 504–510. – DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-6-504-510.

88. *Игошкин, Д.Г.* Активность асфальтогранулята – фактор, определяющий эффективность его применения в асфальтобетонных смесях // Д.Г. Игошкин, С.Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2016. – № 2. – С. 67–70.

89. *Лескин, А.И.* Органическая композиция для восстановления свойств вяжущего в асфальтогрануляте / А.И. Лескин, Д.И. Гофман, С.В. Алексиков, М.М. Аль-Карагули // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 1(74). – С. 33–39.

90. *Ярмолинский, В.А.* Выбор оптимального количества вяжущего при холодном ресайклинге асфальтобетонных покрытий / В.А. Ярмолинский, М.О. Жабкин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 2(65). – С. 49–55.

91. *Веренько, В.А.* Холодные регенерированные смеси на основе асфальтогранулятов для устройства верхних слоев дорожных покрытий / В. А. Веренько, В. В. Занкович, Е. О. Зайцев [и др.] // Дороги и мосты. – 2020. – № 2(44). – С. 187–213.

92. *Чудинов, С.А.* Применение асфальтогранулята в технологиях дорожного строительства / С.А. Чудинов, А.В. Кочеткова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник», Екатеринбург, 25–26 апреля 2017 года. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический университет», 2017. – С. 180–182.

93. *Фомин, А.Ю.* Литой серный бетон дорожного назначения / А.Ю. Фомин, А.А. Кайскайс // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. –

№ 3(3). – С. 28–34.

94. *Лупанов, А.П.* Исследование влияния асфальтового гранулята на свойства литого асфальтобетона / А.П. Лупанов, А.С. Суханов, В.В. Силкин [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 2(44). – С. 201–207.

95. *Веюков, Е.В.* Применение асфальтогранулятов холодного фрезерования в щебеночно-мастичных асфальтобетонах для покрытий автомобильных дорог / Е.В. Веюков, А.В. Веюкова // Экономика строительства. – 2023. – №. 6. – С. 66–68.

96. *Ядыкина, В.В.* Водо- и морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона, приготовленного на битуме, модифицированном сэвиленом / В.В. Ядыкина, С.Н. Наволокина, А.М. Гридчин // Вестник СибАДИ. – 2022. – № 19(1). – С. 102–113.

97. *Черных, Д.С.* Оценка влияния количества асфальтогранулята и технологии его подачи на свойства приготавливаемых асфальтобетонных смесей / Д.С. Черных, Д.А. Строев, Д.В. Задорожный, С.В. Горелов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4(27). – С. 196.

98. *Ярышкин, И.А.* Влияние регенерированной асфальтобетонной смеси на колеяность автомобильных дорог / И.А. Ярышкин // Транспортные сооружения. – 2022. – Т. 9. – № 4. – DOI 10.15862/09SATS422.

99. *Бузиков, Ш.В.* Повышение эксплуатационных показателей верхнего слоя дорожного покрытия с асфальтовым гранулятом / Ш.В. Бузиков, М.В. Мотовилова // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 101–111.

100. *Tarsi, G.* The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: a review / G. Tarsi, P. Tataranni, C. Sangiorgi // Materials (Basel). – 2020. – Vol. 13(18). – Article № 4052.

101. *Hashim, T.M.* Evaluating rutting resistance of rejuvenated recycled hot-mix asphalt mixtures using different types of recycling agents / T.M. Hashim, M.S. Nasr, Y.M. Jebur, A. Kadhim, Z. Alkhafaji, M.G. Baig, S.K. Adekunle, M.A. Al-Osta, S. Ahmad, Z.M. Yaseen // Materials (Basel). – 2022. – Vol. 15(24). – Article № 8769.

102. *El-Maaty, A.A.* Evaluation of hot asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavements / A.A. El-Maaty, A.E. El-Moher // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2025. – Vol. 4. – P. 197–206.

103. *Лупанов, А.П.* Холодные смеси для аварийного ремонта асфальтобетонных покрытий / А.П. Лупанов, А.С. Суханов, В.В. Силкин, С.М. Дмитриев // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ. – 2018. – № 40/2. – С. 316–327.

104. *Willis, J.R.* Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content / J.R. Willis, M. Marasteanu // National cooperative highway research – 2013. – Article № 22554.

105. *Бахрах, Г.С.* Асфальтобетон с добавкой гранулята / Г.С. Бахрах // Дороги и мосты. – 2018. – № 1(39). – С. 22.

106. *Шипицын, В.В.* Обоснование технологии ремонта асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга с применением медленноотверждающих минеральных вяжущих и разжиженного битума: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Шипицын Валерий Валерьевич. – Омск, 2006. – 170 с.

107. *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: Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции, Липецк, 27 февраля 2025 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2025. – С. 79–83.

108. *Hasheminezhad, A.* Sustainability promotion through asphalt pavements: A review of existing tools and innovations / A. Hasheminezhad, H. Ceylan, S. Kim // Sustainable materials and technologies. – 2024. – Vol. 42. – Article № 01162.

109. *Траутвайн, А.И.* Разработка различных видов цементов для устройства конструктивных слоев дорожной одежды на основе асфальтогранулобетонных смесей / А.И. Траутвайн, Д.Г. Тимофеев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 4. – С. 34–45. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-4-34-45.

110. *Соловьева, В.Я.* Инновационные способы подготовки основания транспортных магистралей с использованием техногенных образований металлургического производства / В.Я. Соловьева, А.С. Сахарова, Е.Г. Еремеев. // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 28–42.
111. Направления утилизации золошлаков ТЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arvis.online/analitika/infografika/>
112. *Явинский, А.В.* Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 16–24. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-3-16-24.
113. *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 Международный молодежный форум, 15–16 октября 2016 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 516–521.
114. *Baert, G.* Interaction between the pozzolanic reaction of fly ash and the hydration of cement / G. Baert, I. Van Driessche, S. Hoste, G. De Schutter, N. De Belie // In 12th International congress on the Chemistry of Cement. – 2007.
115. *Пичугин, А.П.* Процессы химического взаимодействия в грунтобетонах, укрепленных комплексными добавками направленного действия / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, И.К. Языков, Н.А. Батина // Фундаментальные основы строительного материаловедения: Сборник докладов Международного онлайн-конгресса, Белгород, 06–11 октября 2017 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. – С. 694–701.
116. *Меренцева, Г.С.* Учет физико-химических факторов при оптимизации технологии укрепления грунтов отходами энергетики в дорожном строительстве / Г.С. Меренцева, А.О. Хребто // Горная промышленность. – 2010. – № 1(89). – С. 60–62.
117. *Хребто, А.О.* Современный опыт использования высококальциевых зол уноса Барнаульской ТЭЦ-3 при ремонте автомобильных дорог методом холодного ресайклинга в условиях Алтайского края / А.О. Хребто, Г.И. Овчаренко, Н.В.

Медведев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. – С. 493–497.

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

119. *Маданбеков, Н.Ж.* Повышение эффективности использования дорожного асфальтобетона путем применения золы-уноса в качестве минерального порошка / Н.Ж. Маданбеков, Б.Ж. Осмонова // Инновационная наука. – 2015. – № 12–2. – С. 121–125.

120. *Осмонова, Б.Ж.* Эколого-экономическая лидерство применения золы уноса в дорожном строительстве / Б.Ж. Осмонова // Универсум: технические науки. – 2016. – № 7 (28). – С. 13.

121. *Ковалёв, Я.Н.* Технологии активации строительных материалов / Я.Н. Ковалёв, Т.А. Чистова. – Минск: БНТУ, 2022. – 142 с.

122. *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 // Научно-емкие технологии и инновации: сборник докладов Международной научно-практической конференции, 06 октября 2017 года – 07 2016 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 381–386.

123. *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 Всероссийской научно-практической конференции, Старый Оскол, 29 ноября 2024 года. – Старый Оскол: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. – С. 588–591.

124. EN 196–5:2011 «Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement». – P. 14.
125. *Donatello, S.* Comparison of test methods to assess pozzolanic activity / *S. Donatello, M. Tyrer, C.R. Cheeseman* // *Cement and Concrete Composites*. – 2010. – Vol. 32. – № 2. – P. 121–127.
126. NF P18–513 «Pozzolanic addition for concrete – Metakaolin. Definitions, specifications and conformity criteria» – 2009.
127. ГОСТ 25094–2015 Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности. – Введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.
128. *Бутт, Ю.М.* Практикум по химической технологии вяжущих материалов // *Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев*. – М.: Высшая школа, 1973. – 504 с.
129. ГОСТ 25818–2017 Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – Введ. 01.03.2018. – М. МНТКС. – 2017. – 23 с.
130. *Маркова, И.Ю.* Золобитумные вяжущие для асфальтобетонных смесей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / *Маркова Ирина Юрьевна*. – Пенза, 2016. – 226 с.
131. *Марков, А.Ю.* Цементасфальтобетон с использованием топливных зол: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / *Марков Андрей Юрьевич* – Белгород, 2021. – 199 с.
132. *Безродных, А.А.* Грунтобетоны с использованием комплекса вяжущих и зол-уноса для дорожного строительства: дисс. ... канд. техн. наук: 2.1. 5 / *Безродных Андрей Юрьевич* – Белгород, 2022. – 228 с.
133. *Марков, А.Ю.* Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов / *А. Ю. Марков, В. В. Строкова, И. Ю. Маркова* // *Строительные материалы*. – 2019. – № 4. – С. 77–83.
134. *Strokova, V.V.* Properties of a Composite Cement Binder Using Fuel Ashes / *V.V. Strokova, I.Y. Markova, A.Y. Markov, M.A. Stepanenko, S.V. Nerovnaya, D.O. Bondarenko, L.N. Botsman* // *Key Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 909. – P. 184–190. DOI 10.4028/p-tm4y4j.
135. *Лебедев, М.С.* Влияние добавок низкокальциевой золы-уноса ТЭС на

характеристики дорожного битумного вяжущего / М.С. Лебедев, В.В. Строкова, И.Ю. Потапова, Э.В. Котлярский // Строительные материалы. – 2014. – № 11. – С. 8–11.

136. *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.

137. *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.

138. *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. – 2019. – 775 (1). – № 012093.

139. *Кожухова, Н.И.* Оценка биопозитивности геополлимерных вяжущих на основе низкокальциевой золы-уноса / Н.И. Кожухова, И.В. Жерновский, В.В. Строкова // Строительные материалы. – 2012. – № 9. – С. 84–85.

140. *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 российской конференции с международным участием. – Сыктывкар: Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2020. – С. 299–300.

141. *Антошкина, Е.Г.* Определение кислотно-основных центров на поверхности зерен кварцевых песков некоторых месторождений России / Е.Г. Антошкина, В.А. Смолко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Физика. Химия. – 2008. – № 7. – С. 65–68.

142. *Нелюбова, В.В.* Исследование активности кремнеземсодержащего сырья с учетом его состава и способа механоактивации / В.В. Нелюбова, А.Л. Попов, В.В. Строкова // Научные технологии и инновации: Сборник докладов Между-

народной научно-практической конференции. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 295–299.

143. *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. Бодман // *Строительные материалы.* – 2024. – № 7. – С. 65–70.

144. *Гусев, Б.В.* Оценка эффективности применения кондиционной минеральной добавки на основе золошлаковых смесей ТЭС в технологии производства бетонов / Б.В. Гусев, А.Н. Набоков, Т.П. Щерблыкина // *Технологии бетонов.* – 2015. – № 5–6(106–107). – С. 38–41.

145. *Sakai, E.* Hydration of fly ash cement / E. Sakai, S. Miyahara, S. Ohsawa S. H. Lee, M. Daimon // *Cement and Concrete Research.* – 2005. – Vol. 35. – Iss. 6. – P. 1135–1140.

146. *Han, T.* Deep learning to predict the hydration and performance of fly ash-containing cementitious binders / T. Han, R. Bhat, S.A. Ponduru, A. Sarkar, J. Huang, G. Sant, A. Kumar // *Cement and Concrete Research.* – 2023. – Vol. 165. – P. 107093.

147. *Лебедев, М.С.* Асфальтовяжущие с использованием алюмосиликатного сырья: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Лебедев Михаил Сергеевич – Белгород, 2012. – 241 с.

148. *Шангина, Н.Н.* Прогнозирование физико-механических характеристик бетонов с учетом донорно-акцепторных свойств поверхности наполнителей и заполнителей: дисс. ... д-р. техн. наук: 05.23.05 / Шангина Нина Николаевна – Санкт-Петербург, 1998. – 372 с.

149. *Путилин, Е.И.* Применение зол-уноса и золошлаковых отходов при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта и применения отходов от сжигания твёрдого топлива ТЭС / Е.И. Путилин, В.С. Цветков. – М.: Союздорнии, 2003. – 32 с.

150. *Галибина, Е.А.* Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающая их рациональное направление использования

для производства строительных материалов / Исследования по строительству: Строительная теплофизика. Долговечность конструкций. – Талин, 1981. – С. 75–82.

151. *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.

152. *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.

153. *Тейлор, Х.* Химия цемента / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

154. *Чулкова, И.Л.* Структурообразование строительных композитов на основе принципа сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2012. – № 6(28). – С. 83–87.

155. *Марков, А.Ю.* Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол / А.Ю. Марков, И.Ю. Маркова, В.В. Строкова, Т.В. Дмитриева, М.А. Степаненко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 3. – С. 26–33.

156. Патент № 2773394 Российская Федерация, МПК С04В 26/26. Состав цементасфальтобетонной смеси дорожно-строительного назначения: № 2021125962: заявл. 02.09.2021; опубл. 03.06.2022 / Строкова В.В., Маркова И.Ю., Марков А.Ю. [и др.]; заявитель и правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова.

157. Патент № 2775249 Российская Федерация, МПК С04В 26/26. Состав цементасфальтобетона дорожно-строительного назначения: № 2021125966: заявл. 02.09.2021; опубл. 28.06.2022 / Маркова И.Ю., Строкова В.В., Марков А.Ю. [и др.]; заявитель и правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова.

158. *Жарин, Н.С.* Анализ методов производства работ при регенерации дорожной одежды. – 2023. – С. 385–387.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

### Протокол измерений теплоты гидратации составов вяжущего

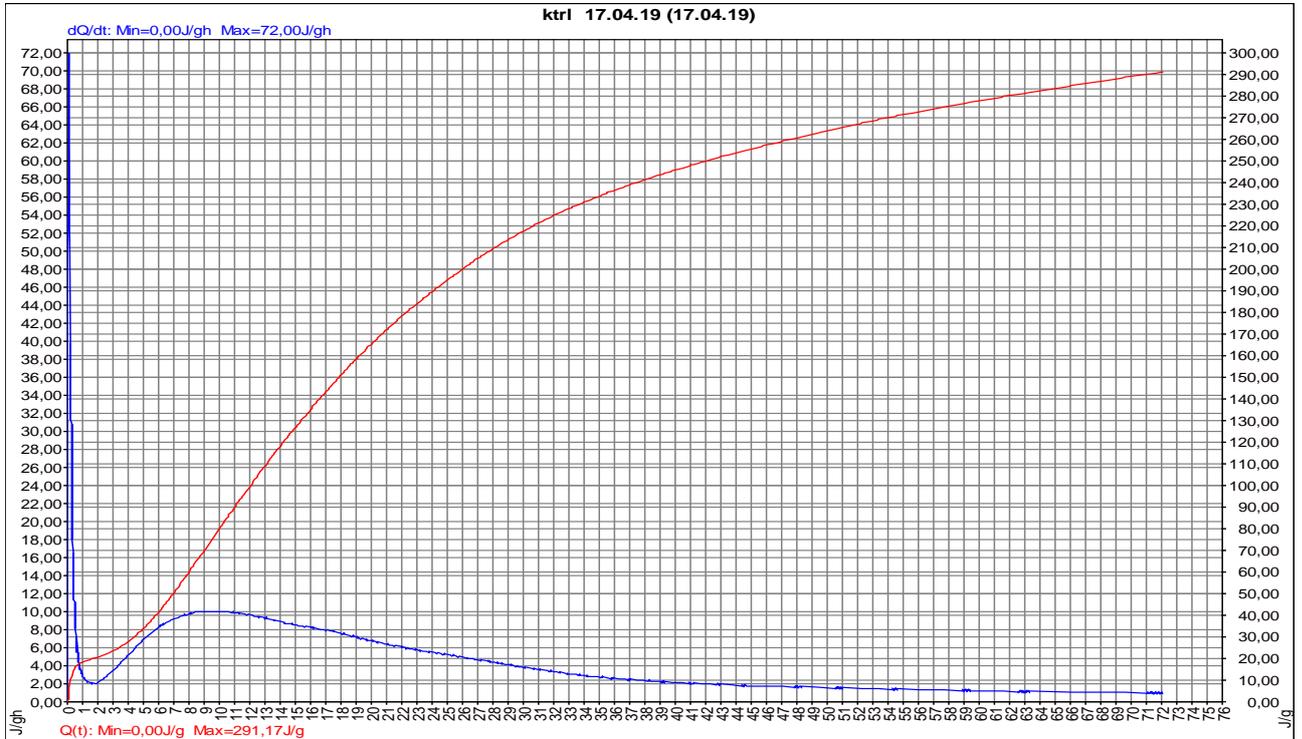


Рисунок А.1. Теплота гидратации чистого цемента

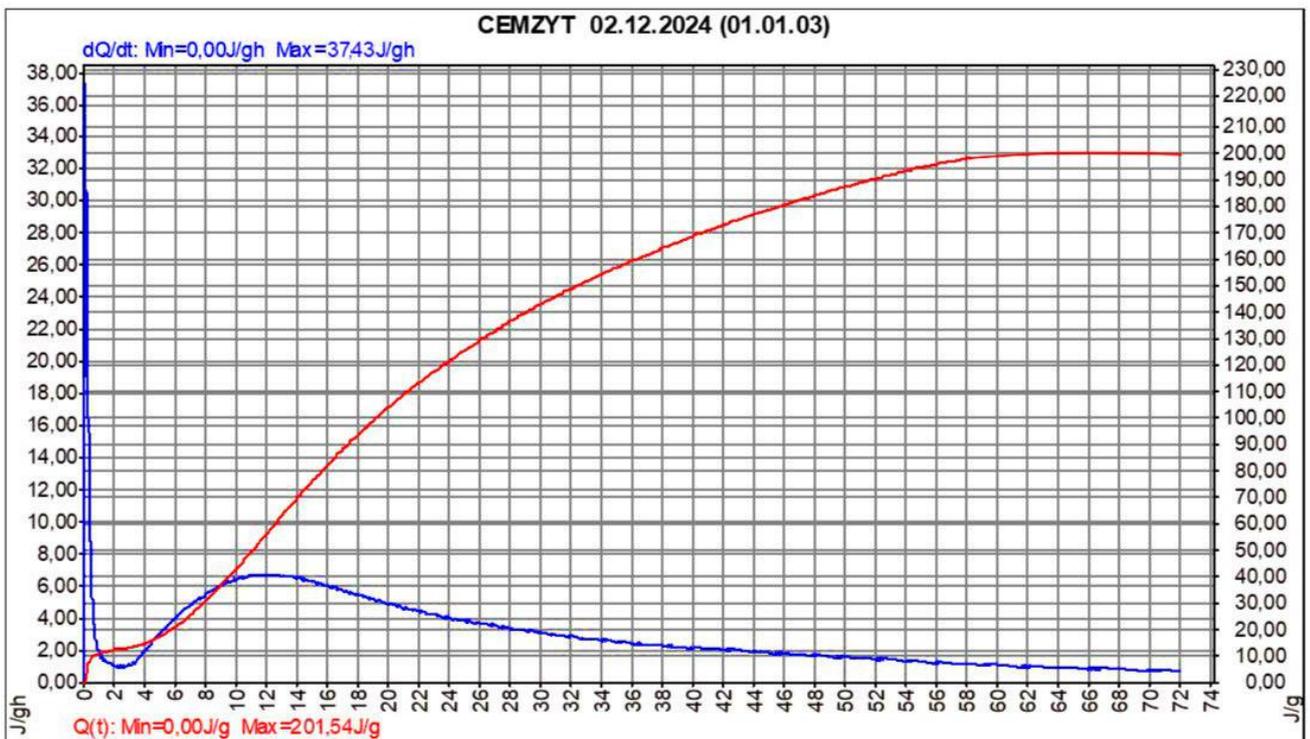


Рисунок А.2. Теплота гидратации с золой-уноса Троицкой ГРЭС (1)

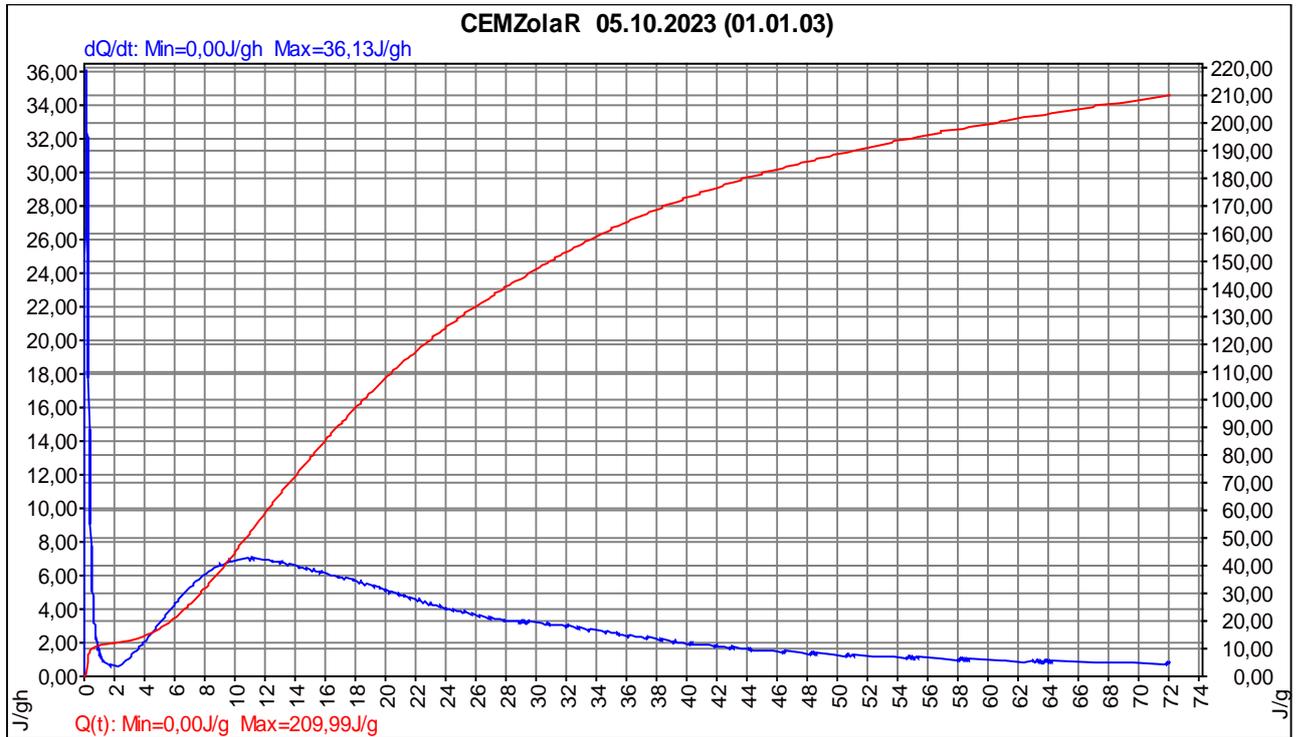


Рисунок А.3. Теплота гидратации с золой-уноса Рефтинской ГРЭС

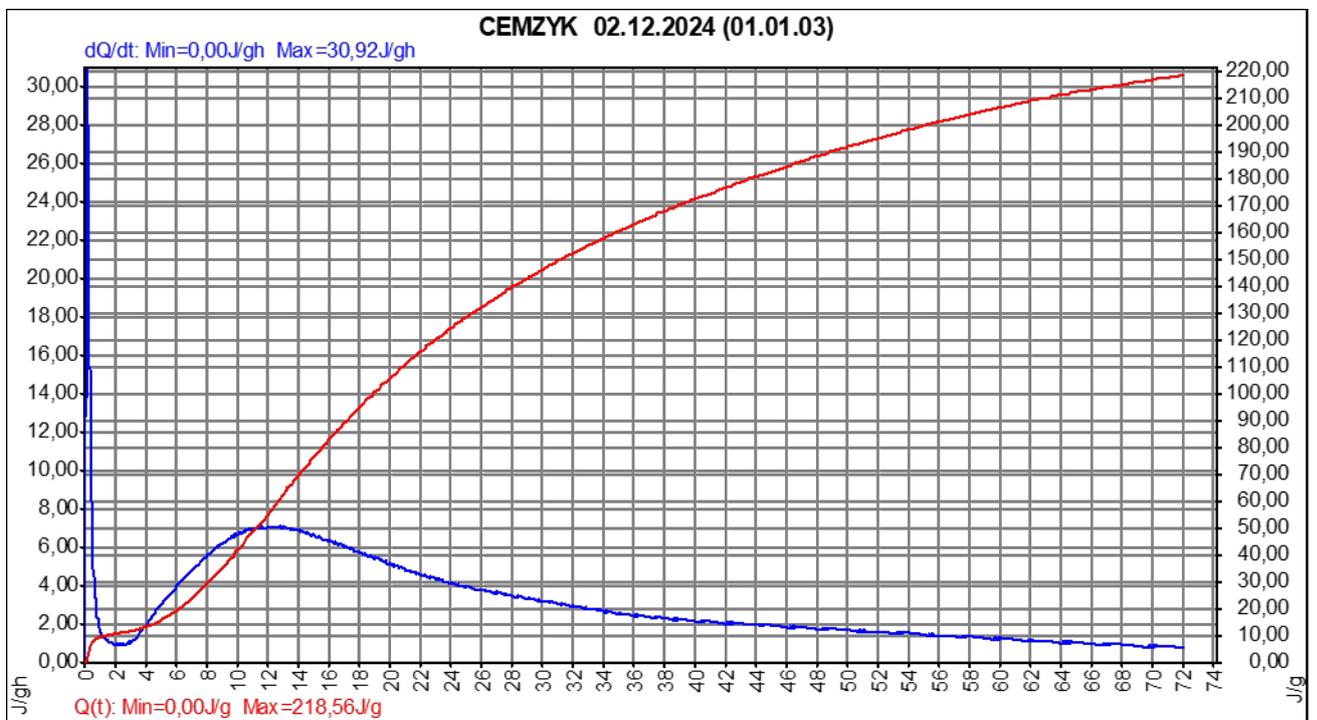


Рисунок А.4. Теплота гидратации с золой-уноса Кемеровской ГРЭС

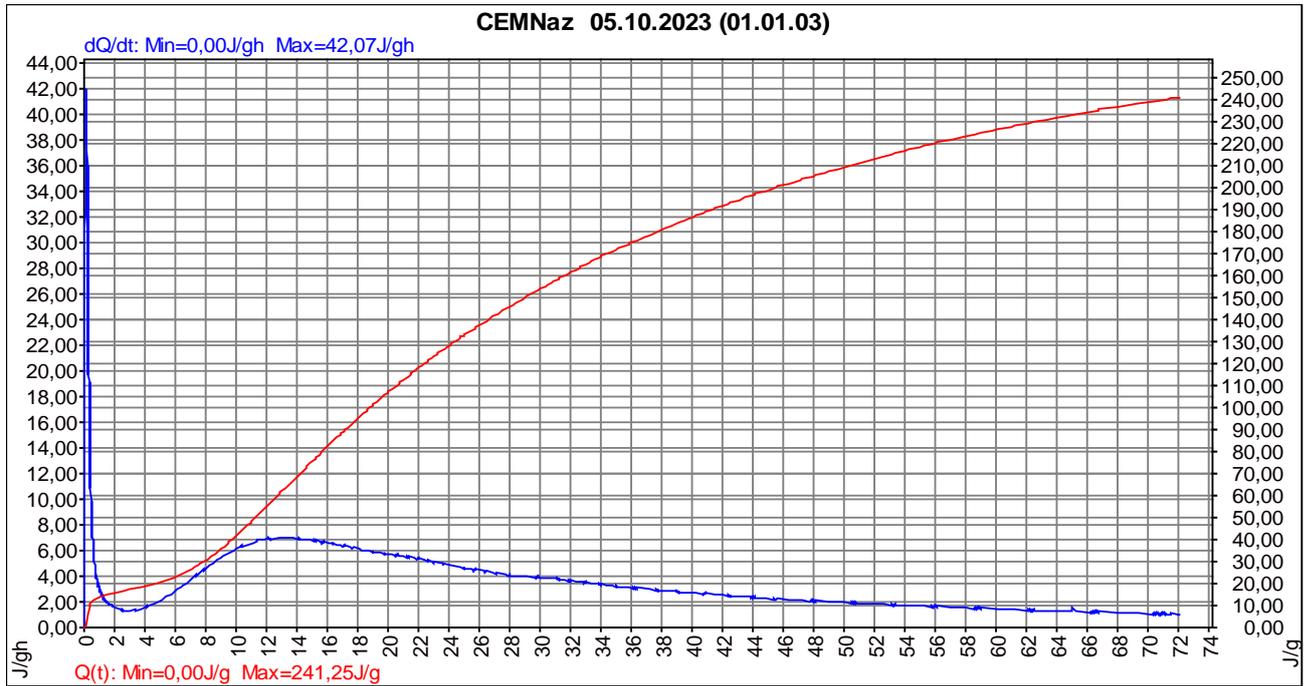


Рисунок А.5. Теплота гидратации с золой-уноса Назаровской ТЭС

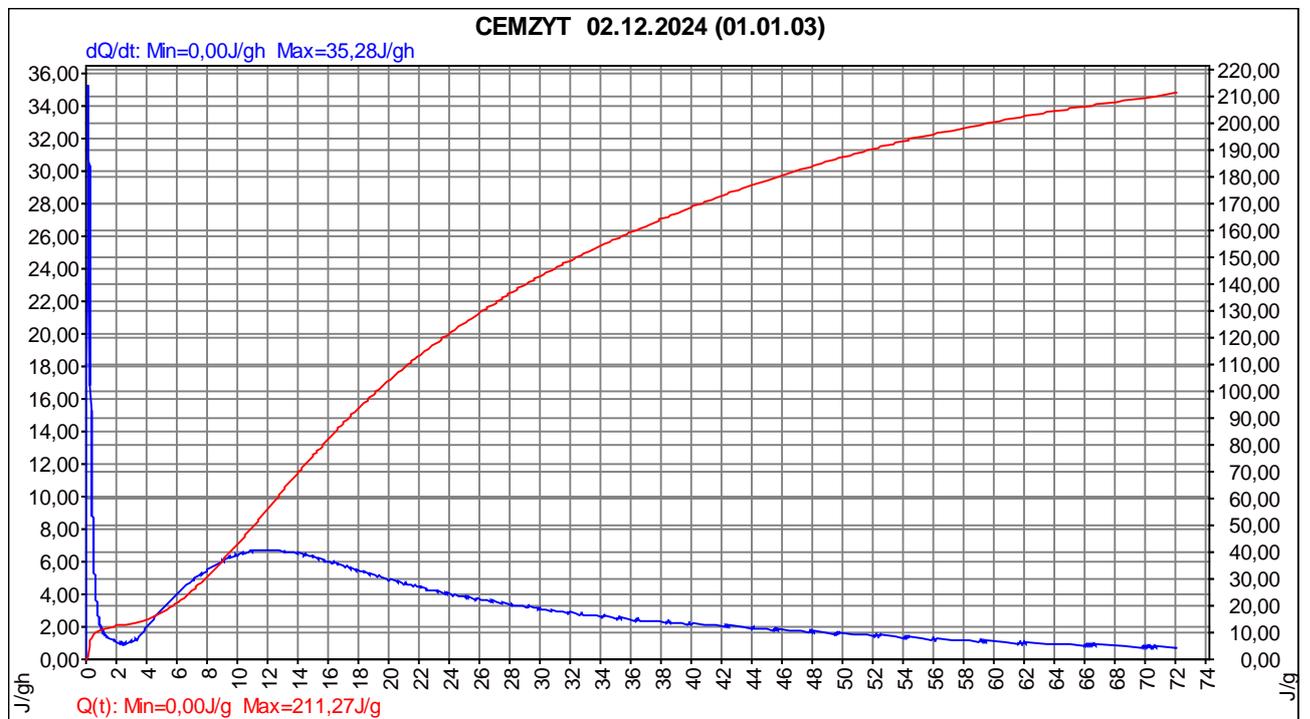


Рисунок А.6. Теплота гидратации с золой-уноса Троицкой ГРЭС (2)

Титульный лист рекомендаций по использованию  
асфальтогранулобетонных смесей с применением зол-уноса

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА**



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной  
и инновационной деятельности

д-р техн. наук, профессор

Т.М. Давыденко

«19» апреля 20 25 г.

**РЕКОМЕНДАЦИИ**

**на изготовление асфальтогранулобетонных смесей  
с применением зол-уноса**

**РАЗРАБОТАНО**

заведующий кафедрой:

д-р техн. наук, профессор

«19» апреля 20 25 г. В.В. Строкова

«19» апреля 20 25 г.

Исполнители:

канд. техн. наук

«19» апреля 20 25 г. И.Ю. Маркова

«19» апреля 20 25 г.

соискатель

«19» апреля 20 25 г. М.А. Степаненко

«19» апреля 20 25 г.

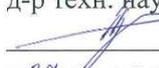
Белгород 2025 г.

Титульный лист стандарта организации «Асфальтогранулобетонные смеси с применением техногенного сырья в виде зол-уноса. Технические условия»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**

**СОГЛАСОВАНО:**

Первый проректор  
д-р техн. наук, профессор  
 Е.И. Евтушенко  
«27» марта 2025 г.

**УТВЕРЖДАЮ:**

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,  
д-р техн. наук, профессор  
 С.Н. Глаголев  
«27» марта 2025 г.



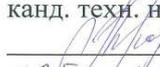
**АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫЕ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ВИДЕ ЗОЛ-УНОСА**

Технические условия  
СТО 02066339-083-2025

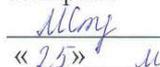
**РАЗРАБОТАН:**

Заведующий кафедрой:  
д-р техн. наук, проф.  
 В.В. Строкова  
«25» марта 2025 г.

Исполнители:

канд. техн. наук  
 И.Ю. Маркова  
«25» марта 2025 г.

аспирант

 М.А. Степаненко  
«25» марта 2025 г.

Белгород 20 25 г.

Титульный лист технологического регламента на получение  
асфальтогранулобетонных смесей с использованием зол-уноса

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной  
и инновационной деятельности

Т.М. Давыденко

« 29 » мая 2025 г.



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ**

на получение асфальтогранулобетонных смесей  
с использованием зол-уноса

**СОГЛАСОВАНО**

Канд. техн. наук,  
главный инженер ООО «Герба»,

А.В. Высоцкий

« 26 » мая 2025 г.



**РАЗРАБОТАНО**

Д-р техн. наук, профессор

В.В. Строкова

« 23 » мая 2025 г.

Канд. техн. наук, доцент

И.Ю. Маркова

« 23 » мая 2025 г.

Инженер 2-й категории

М.А. Степаненко

« 23 » мая 2025 г.

Белгород 2025 г.

## Протокол о намерениях



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной  
и инновационной деятельности

Т.М. Давыденко

20 25 г.

### ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

Дефицит качественных минеральных материалов для строительной отрасли вызван рядом причин и обусловлен, прежде всего, запретом на добычу из-за соображений экологической безопасности. На сегодняшний день инициатива, вводящая запрет на добычу общераспространенных полезных ископаемых, находится на доработке с целью ужесточения. Также существует острая необходимость оперативно приводить объекты инфраструктуры в надлежащий вид для обеспечения качества жизни населения. Ввиду неоднократно повторяющихся разрушающих воздействий на территории Белгородской области, разрабатываемые решения должны быть экономичными и отличаться возможностью быстрой реализации.

В этой связи, использование асфальтогранулобетонов, разработанных на основе асфальтобетонного гранулята, с применением зол-уноса, обеспечивающих сохранение физико-механических характеристик конечных композитов при эксплуатации в различных слоях дорожной одежды, является актуальным для производителей.

В связи с вышесказанным, мы нижеподписавшиеся, канд. техн. наук, главный инженер ООО «Герба» А.В. Высоцкий, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технологии материалов» БГТУ им. В.Г. Шухова В.В. Строкова, составили настоящий протокол о том, что в рамках областной программы по строительству автомобильных дорог планируется строительство участка автомобильной дороги с применением в качестве основания слоя из асфальтогранулобетона, полученного согласно технологическому регламенту, разработанному к.т.н. И.Ю. Марковой и соискателем М.А. Степаненко.

**От ООО «Герба»**

Главный инженер, к.т.н.



А.В. Высоцкий

**Представители от БГТУ им. В.Г. Шухова**

Зав. кафедрой МиТМ, д.т.н., проф.

В.В. Строкова

Дцент каф. МиТМ, к.т.н., доц.

И.Ю. Маркова

Инженер 2-й категории  
ИНО и ОПЦ НКМ

М.А. Степаненко

