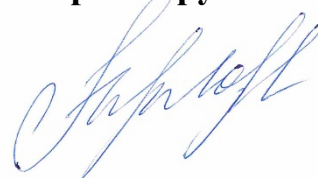


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



МАРКОВА ИРИНА ЮРЬЕВНА

**ЗОЛОБИТУМНЫЕ ВЯЖУЩИЕ
ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

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



**Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Строкова В.В.**

Белгород 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1. Состояние сырьевой базы дорожно-строительных асфальтобетонов. Существующие проблемы и методы их решения	11
1.2. Повышение качества применяемых битумов.	28
1.3. Представление о роли наполнителя битума в асфальтобетонах с учетом его природы, дисперсности и состояния поверхности	42
1.4. Особенности получения золошлаковых отходов и опыт их применения в составе асфальтовых композиций.	49
1.5. Выводы.	59
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	61
2.1. Методы исследований.	61
2.1.1. Оценка физико-механических характеристик сырьевых компонентов, модифицированного вяжущего и асфальтобетонов на его основе.	61
2.1.2. Оценка состава, физико-химических свойств и структурных особенностей сырьевых и синтезированных материалов	64
2.2. Характеристика применяемых материалов.	68
2.2.1. Компоненты модифицированного органического вяжущего. ...	68
2.2.2. Свойства компонентов минеральной части асфальтобетона. ...	69
2.3. Выводы	72
3. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛ-УНОСА ТЭС В КАЧЕСТВЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ БИТУМА	74
3.1. Физико-механические характеристики техногенного сырья	74
3.2. Состав и физико-химические особенности зол-уноса	88
3.3. Микроструктурные особенности зол-уноса с точки зрения применения в качестве наполнителей битумов	96
3.4. Выводы.	103
4. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО БИТУМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ЗОЛЫ-УНОСА.	105
4.1. Составы и свойства битумов, модифицированных золами-уноса различного состава	105

4.2. Анализ реологических свойств битумов, модифицированных золами-уноса различного состава	130
4.2.1. Методика определения реологических характеристик битумов	131
4.2.2. Реотехнологические свойства битума, модифицированного золами-уноса различного состава	135
4.3. Составы и свойства асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих	144
4.4. Устойчивость асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих к колееобразованию	152
4.5. Выводы.	156
5. ТЕХНОЛОГИЯ И ТЭО ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОБИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО.	160
5.1. Технология производства асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих	160
5.2. Техничко-экономическое обоснование эффективности применения золобитумных вяжущих для получения асфальтобетона	171
5.3. Внедрение результатов исследований	185
5.4. Выводы	186
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	190
ПРИЛОЖЕНИЯ.	216

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Одной из приоритетных задач в России является развитие транспортной инфраструктуры. На сегодняшний день протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием составляет около 1 млн км. В соответствии с Транспортной стратегией России до 2030 года общая протяжённость дорожной сети автодорог РФ должна достигнуть 1,7 млн км.

Эксплуатация асфальтобетонных покрытий в условиях агрессивного воздействия внешних факторов и непрерывного роста количества транспортных средств приводит к образованию различных дефектов и, как следствие, к преждевременным деформациям и разрушению автомобильных дорог. Большинство дефектов обусловлено, прежде всего, спецификой физико-механических и реологических свойств используемого органического вяжущего. Регулировать технико-эксплуатационные показатели битума позволяет применение модифицирующих добавок, воздействующих на его структуру и свойства и, как следствие, повышающих качество дорожно-строительных композитов. Однако использование добавок приводит к значительному удорожанию асфальтобетона.

Актуальным является расширение номенклатуры модифицирующих добавок со структурирующим эффектом, в том числе за счет использования отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса (ЗУ). Повышение качества битума с использованием добавки зол-уноса возможно за счет совокупности их физико-механических, физико-химических и структурных особенностей, которые определяют характер взаимодействия на границе раздела фаз системы «битум – зола-уноса».

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания и программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова; программы «У.М.Н.И.К.».

Степень разработанности темы. Проблеме повышения эффективности производства и применения битумоминеральных композитов для дорожного строительства в последние годы уделяется особое внимание как в России, так и за

рубежом. Одним из наиболее распространенных методов повышения эксплуатационных характеристик битумоминеральных композиций является модифицирование битумов посредством введения добавок различного состава и генезиса.

Ранее была показана эффективность использования природного и техногенного алюмосиликатного сырья для производства битумоминеральных композиций с повышенными физико-механическими характеристиками. Среди многообразия алюмосиликатного сырья, применяемого в дорожном строительстве, золы-уноса показали достаточную эффективность в качестве минеральных порошков. Однако возможность и эффективность применения зол-уноса в качестве структурирующей добавки к битуму в зависимости от состава недостаточно изучены.

Цель и задачи работы. Разработка золобитумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе с учетом фазовых и структурных особенностей зол-уноса различного состава.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение состава, свойств и морфоструктурных особенностей зол-уноса с целью их использования в качестве структурирующей добавки к битуму;
- исследование влияния вариативности свойств зол-уноса на эксплуатационные характеристики органического вяжущего;
- подбор составов золобитумных вяжущих с использованием алюмосиликатного техногенного сырья и асфальтобетонных смесей на их основе с последующим изучением характеристик получаемых композитов;
- подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований; внедрение результатов исследований.

Научная новизна работы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования зол-уноса ТЭС в качестве структурирующей добавки к битуму при производстве асфальтобетона. Показано, что структурирующая роль зол-уноса, обусловленная видом и технологией сжигания топлива, а также удаления зольных отходов, заключается в интенсификации процессов хемосорбции в результате взаимодействия компонентов битума с поверхностью алюмосиликатного модификатора за счет особенностей его химико-

минерального состава и физической адсорбции, обусловленной морфоструктурными особенностями. Это в совокупности позволяет повысить физико-механические и вязкоупругие свойства битума.

Установлен характер влияния зол-уноса на реотехнологические и физико-механические свойства золобитумного вяжущего в зависимости от их состава. Использование полидисперсного алюмосиликатного модификатора в качестве структурирующего компонента приводит к оптимизации структуры вяжущего, расширению диапазона эксплуатационных температур, росту устойчивости к напряжениям сдвига и температуры размягчения, снижению пенетрации и дуктильности при нормируемых температурах. Применение золобитумного вяжущего позволяет повысить теплостойкость асфальтобетона и его деформативную устойчивость при эксплуатации в летний период.

Произведено ранжирование зол-уноса различного состава по степени эффективности их использования в качестве модифицирующих агентов битума по физико-химическим и технологическим критериям. По совокупности факторов установлена следующая последовательность повышения структурирующей роли зол-уноса проанализированных видов: WE Energies (низкокальциевая) → Новотроицкой ТЭС (низкокальциевая) → Троицкой ГРЭС (низкокальциевая) → Рефтинской ГРЭС (низкокальциевая) → Columbia Energy Center (высококальциевая) → Назаровской ТЭС (высококальциевая).

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложен принцип проектирования золобитумного вяжущего для асфальтобетонов с использованием высокодисперсных алюмосиликатных отходов ТЭС – зол-уноса различного состава, заключающийся в оценке химико-минеральных и морфоструктурных особенностей зол-уноса, а также реотехнологических свойств золобитумного вяжущего по методу Supergrave в измерительной системе пластина/пластина (РР) в диапазоне температур от 46 до 76 °С с приложением осциллирующей нагрузки при определении структурирующей способности алюмосиликатных модификаторов по отношению к битуму.

Расширена номенклатура модифицирующих компонентов, используемых для повышения качества битумов за счет применения алюмосиликатного техногенного сырья из отходов ТЭС в виде зол-уноса.

Разработаны рациональные составы золобитумных вяжущих с применением структурирующей добавки в виде зол-уноса различных предприятий.

Предложены составы асфальтобетонных смесей на основе золобитумных вяжущих, позволяющие производить асфальтобетоны типа Б с прочностью при сжатии при температуре 50, 20 и 0 °С – 2,2–2,9 МПа, 4,4–6,2 МПа и 9,7–9,9 МПа соответственно; сдвигоустойчивостью по коэффициенту внутреннего трения – 0,85–0,91; по сцеплению при сдвиге при температуре 50 °С – 0,62–0,86; трещиностойкостью – 4,0–4,3 МПа; водостойкостью – 0,89–0,98; водонасыщением – 1,52–1,75 % и водостойкостью при длительном водонасыщении 0,77–0,9.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой работы являются результаты фундаментальных и прикладных исследований отечественных и зарубежных ученых в области органоминеральных вяжущих, дорожно-строительных материалов, технологической минералогии. Методология построена на известной роли модифицирующих компонентов различного состава и генезиса в структурировании битума и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации. Идея базируется на фундаментальных исследованиях по влиянию минеральных наполнителей на процессы структурообразования органоминеральных композитов дорожно-строительного назначения.

Исследования проводили как в соответствии с нормативными документами, так и с использованием новейших методик и оборудования. Качественный и количественный анализ фазовой гетерогенности исследуемых материалов выполняли с использованием количественного полнопрофильного РФА, основанного на методе Ритвельда. Удельную поверхность техногенного сырья определяли методами воздухопроницаемости и адсорбции газа; структурные особенности зол-уноса изучали с применением оптической и электронной микроскопии. Анализ

вязкоупругих свойств золобитумных вяжущих осуществляли по методу Supergrave с использованием прибора Rheotest RN 4.1.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования зол-уноса ТЭС в качестве структурирующей добавки к битуму при производстве асфальтобетона;
- характер влияния зол-уноса на реотехнологические и физико-механические свойства золобитумного вяжущего;
- ранжирование зол-уноса различного состава по степени эффективности их использования в качестве модифицирующих агентов золобитумного вяжущего;
- рациональные составы золобитумных вяжущих с применением зол-уноса различного состава в качестве структурирующих добавок;
- составы и технология производства асфальтобетонов на основе золобитумного вяжущего. Результаты внедрения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: использованием широкого спектра методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования; проведением экспериментов с достаточной воспроизводимостью; сходимостью теоретических решений с экспериментальными данными; сопоставимостью полученных результатов с работами других авторов; промышленными испытаниями и их положительными практическими результатами.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на Международных научно-практических конференциях: «Инновационные материалы и технологии» (XX научные чтения) (Белгород, 2011); «Технические науки – от теории к практике» (XXIV чтения) (Новосибирск, 2013); XXII Конгрессе исследования материалов (Канкун, Мексика, 2013); «Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений» (Белгород, 2013); «Научные техноло-

гии и инновации» (XXI научные чтения, юбилейные, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова) (Белгород, 2014); а также на: IX Межрегиональной научно-технической конференции молодых ученых, специалистов и студентов ВУЗов «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий» (Апатиты, 2015); Всероссийском совещании заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов «Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика» (Белгород, 2015).

Внедрение результатов исследований. Апробация производства золобитумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе проводилась в промышленных условиях на базе предприятия ООО «Мостдорстрой». Разработанные материалы использованы для устройства верхнего слоя покрытия в ходе капитального ремонта участка автомобильной дороги III категории в Белгородском районе.

Для внедрения результатов работы разработаны следующие технические документы: Рекомендации по применению зол-уноса различного состава в качестве добавок, структурирующих битум; Стандарт организации СТО 02066339-023-2014 «Золобитумное вяжущее с использованием зол-уноса ТЭС. Технические условия»; Стандарт организации СТО 02066339-024-2014 «Асфальтобетон на основе золобитумного вяжущего. Технические условия»; Технологический регламент на производство асфальтобетонов с использованием золобитумных вяжущих.

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – Строительство профилю подготовки «Автомобильные дороги и аэродромы»; магистров по направлению 08.04.01 – Строительство профилям подготовки «Дорожно-строительное материаловедение», «Автомобильные дороги», «Материаловедение и технология материалов».

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы изложены в 12 научных публикациях, в том числе: в 3

статьях в российских рецензируемых научных изданиях; в 1 статье в издании, индексируемом базой данных Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, основной части (пяти глав), заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 226 страницах машинописного текста, включающего 33 таблицы, 61 рисунок, список литературы из 240 наименований, 8 приложений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Состояние сырьевой базы дорожных асфальтобетонов.

Существующие проблемы и методы их решения

Согласно современным представлениям уровень социально-экономического развития государства определяется состоянием внутренней инфраструктуры и развитостью транспортной сети. На данный момент состояние сети автомобильных дорог Российской Федерации не удовлетворяет в полной мере потребностям населения, экономики, транспортной инфраструктуры, требованиям к техническому состоянию и пропускной способности. Актуальность проблемы строительства новых и ремонта существующих дорожных покрытий связана с увеличением числа автомобильного транспорта в общем потоке пассажирских и грузоперевозок.

Общая протяженность автомобильных дорог во всем мире сегодня составляет около 31 млн. км, из которых на территорию Российской Федерации приходится лишь около 3 % [1]. Данная цифра уступает Соединенным Штатам Америки в 7 раз. Если сравнивать по показателю проникновения дорог, то на 100 км² площади в Соединенных Штатах приходится 66 км, в 27 странах Европейского Союза – 126 км, а в Российской Федерации лишь 5,5 км. Таким образом, актуальным является строительство в больших объемах новых, а также ремонта и реконструкции существующих дорожных покрытий.

Дорожное строительство – это одна из наиболее крупнотоннажных отраслей промышленности, что заставляет акцентировать внимание на колоссальной потребности в сырьевых материалах, что, в свою очередь, определяет одно из направлений и приоритетных задач государственной деятельности, отраженные в «Транспортной стратегии» [2]. Строительство автомобильных дорог федерального значения финансируется на основе подпрограммы «Автомобильные дороги» федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России 2010–

2020 годы», реализуемой Федеральным дорожным агентством Министерства транспорта РФ [3]. В результате реализации подпрограммы планируется увеличить протяженность автомобильных дорог общего пользования на 50 %.

В настоящее время ученые и специалисты в области дорожного строительства уделяют особое внимание качеству строительства автомобильных дорог, проводят поиск новых эффективных решений для его дальнейшего повышения, а также увеличения безремонтного срока эксплуатации твердых покрытий. Причем основным материалом для устройства покрытий автомобильных дорог остается асфальтобетон. Протяженность дорог с таким покрытием в Российской Федерации превышает 330 тысяч км. Федеральная служба государственной статистики насчитывает около 1200 компаний-производителей различных видов асфальтобетона. Его также производят на модульных установках, что в разы увеличивает масштабность применения. Но, как и любой другой материал, асфальтобетон и, соответственно, покрытия из него, имеют свои достоинства и недостатки (рисунок 1.1).

По сравнению с наиболее близкими к ним цементобетонными покрытиями их отличает высокая ровность, хорошее сцепление с колесом автомобиля, отсутствие температурных швов. Все это обеспечивает движение не только отдельного автомобиля, но и всего транспортного потока с заданной нормативной скоростью до 150 км/ч и выше. В соответствии с литературными данными количество автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием, по сравнению с цементобетонными аналогами, на дорогах общей сети составляет около 97 % [4]. Также обычной практикой является укладка асфальтобетонного слоя поверх цементобетонного покрытия после выработки им своего ресурса вместо его капитального ремонта, такой опыт реконструкции дорог с цементобетонными покрытиями нашел широкое применение, как в нашей стране, так и за рубежом [5].

Следовательно, первоочередной задачей отрасли дорожного хозяйства остается повышение качества и долговечности асфальтобетонного покрытия [6]. Решением является производство и применение асфальтобетона с повышенными показателями эксплуатационных характеристик и долговечностью [7]. Улучшение

свойств возможно, как за счет влияния на характеристики сырьевых компонентов, так и за счет влияния на свойства самого композита.



Рисунок 1.1 – Достоинства и недостатки покрытий из асфальтобетона

Вопросам проектирования дорожно-строительных материалов, строительства и ремонта асфальтобетонных покрытий во всем мире уделяется огромное внимание, так как в результате эксплуатации асфальтобетонные покрытия подвергаются весьма серьезным внешним воздействиям: силовому воздействию нагрузок от колес автомобилей, атмосферным осадкам в виде дождя и снега, а

также температурным изменениям, протекающим во времени, замораживанию и оттаиванию и др.

Основными причинами, вызывающими поверхностные разрушения асфальтобетонного покрытия, являются:

- использование некачественных сырьевых материалов;
- передозировка битума, вызывающая повышенную жирность асфальтобетонной смеси [5];
- нарушения в технологии приготовления асфальтобетонной смеси (плохое перемешивание в смесителе) с последующим проявлением пятен битума, выступающих на поверхности покрытия;
- недостаточное уплотнение (коэффициент уплотнения ниже нормы по СНиП 3.06.03-85).

Следовательно, для повышения устойчивости асфальтобетона к реальным условиям эксплуатации необходимо учесть ряд обстоятельств. Из практики эксплуатации дорог следует, что чем больше щебня и вяжущего в составе асфальтобетона, тем он более устойчив к истиранию. Прочность щебня и его устойчивость к истиранию также оказывает существенное влияние на процесс износа. Хорошая адгезия битума к каменному материалу и оптимальное количество асфальтовяжущего в смеси способствуют лучшему удерживанию мелких фракций асфальтобетона на поверхности слоя. Но даже много щебенистые асфальтобетоны из высокопрочного щебня основного химико-минералогического состава на модифицированном битуме не способны устоять перед истирающим воздействием шипованных автомобильных колес.

Наиболее характерным видом разрушений асфальтобетонных покрытий (рисунок 1.2) являются трещины, выбоины, заплаты, колеи, выкрашивание, шелушение, разрушение кромок [8]. Их появление связано с воздействием погодно-климатических факторов, транспортных нагрузок и изменением свойств материалов со временем и, в связи с несвоевременным ремонтом начальной стадии повреждения, площадь повреждений может достигать до 60–80 % от общей площади покрытия [9, 10]. Следовательно, применение эффективных методов

борьбы с трещинообразованием и сдвигоустойчивостью позволило бы увеличить сроки службы покрытий, снизить затраты на их содержание и ремонт за счет повышения устойчивости слоев к появляющимся трещинам.

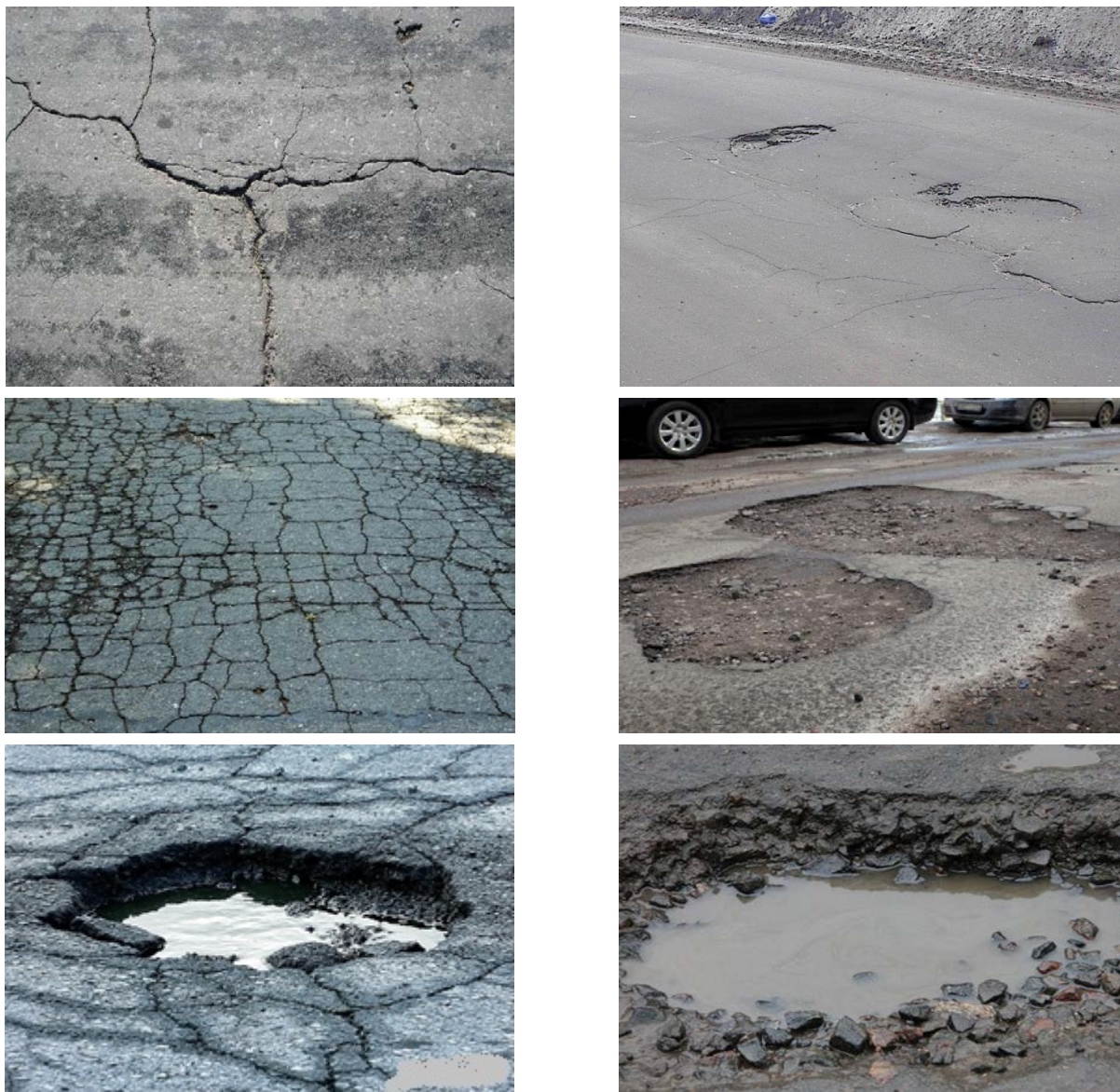


Рисунок 1.2 – Виды разрушений асфальтобетонного покрытия

Установлено, что реологические и прочностные свойства асфальтобетона, типы конструкции дорожной одежды и условия эксплуатации, а также прочность асфальтобетона характеризуются ярко выраженной временной зависимостью от степени трещинообразования и сдвигоустойчивости асфальтобетонного покрытия. А интенсивность релаксационных процессов при деформировании и разрушении битумных материалов в значительной степени зависит от температуры и уровня действующих напряжений [11].

В общем случае устойчивость материала к появлению трещин и колея различного вида определяется следующими его свойствами: теплофизическими (коэффициент линейного температурного расширения), деформационными (модуль релаксации при расчетной низкой температуре), прочностными (предельная структурная прочность) и усталостными (уровень повреждаемости материала покрытия) [12].

Анализ большого количества научных публикаций и нормативной литературы позволяет сделать вывод о том, что существует множество подходов к оценке трещиностойкости и сдвигоустойчивости дорожных покрытий. Однако зависимость прочностных свойств асфальтобетона от реологических свойств вяжущего заставляет акцентировать свое внимание на влиянии составляющих асфальтобетонной смеси на данный показатель. Так как битум является основной реологической составляющей смеси, то применение материала хорошего качества или модифицированного аналога позволит увеличить бездефектный период после укладки покрытия [13].

Таким образом, исследование сырьевой базы дорожных асфальтобетонов необходимо проводить комплексно. В современном дорожном строительстве существует ряд проблем и задач в части обеспечения качественным сырьем, от детального изучения свойств до рассмотрения процессов взаимодействия компонентов смеси на макро-, микро- и наноуровнях.

Переходя к обсуждению проблем сырьевых компонентов асфальтобетонной смеси, стоит акцентировать внимание на самом понятии для четкого понимания сложившихся проблем асфальтобетона и методов их решения.

Асфальтобетоном называют искусственный строительный материал, полученный после уплотнения асфальтобетонной смеси, приготовленной в смесителях в нагретом состоянии и включающей рационально подобранные минеральные материалы (щебень, песок, минеральный порошок) и битум [14–18]. Наиболее ценным преимуществом асфальтобетона, по мнению Ю.М. Баженова, является отсутствие воды в его составе, это обеспечивает высокую плотность и непроницаемость материала [19].

В себестоимости производства асфальтобетонных смесей материалоемкость продукции составляет наибольшую часть – 82 %. Ежегодный рост стоимости материалов (включая щебень, минеральный порошок и битум) и энергоресурсов приводит к росту себестоимости асфальтобетонных смесей в среднем на 25,2 % [20]. Данное обстоятельство заставляет детально изучить рынок сырьевой базы дорожных асфальтобетонов, и, обозначить существующие проблемы и методы их решений.

В структуре асфальтобетонной смеси (рисунок 1.3) можно выделить следующие компоненты: крупный и мелкий заполнитель, основной функцией которых является создание высокопрочного каркаса смеси, минеральный порошок, основное назначение которого состоит в заполнении порового пространства между зернами мелкого и крупного заполнителей, а также приведении битума в пленочное состояние, и вяжущего, сущность которого состоит в «склеивании» частиц неорганической части асфальтобетонной смеси.

Выбор конкретных составляющих асфальтобетонной смеси и технические требования, предъявляемые к ним, определяются ролью компонентов в структуре асфальтобетона, его назначением и свойствами [21].

В качестве крупного заполнителя традиционно применяют щебень или гравий из горных пород изверженного, осадочного и метаморфического происхождения, а также из некоторых разновидностей атмосферостойких и прочных шлаков. Являясь макроструктурной единицей, крупный заполнитель формирует каркас асфальтобетона. Данный компонент является основополагающим, он составляет около 85 % от массы смеси. И, соответственно, к его качеству предъявляются высокие требования, которые, в свою очередь, зависят, как от способа производства, так и от происхождения.

Для оценки степени эффективности применения каменного материала следует учитывать ряд свойств, регламентируемых ГОСТ 8267 [22] и ГОСТ 8269.0-97 [23] (рисунок 1.4). А в зависимости от марки и типа асфальтобетона щебень должен соответствовать требованиям ГОСТ 9128–2013 [24].

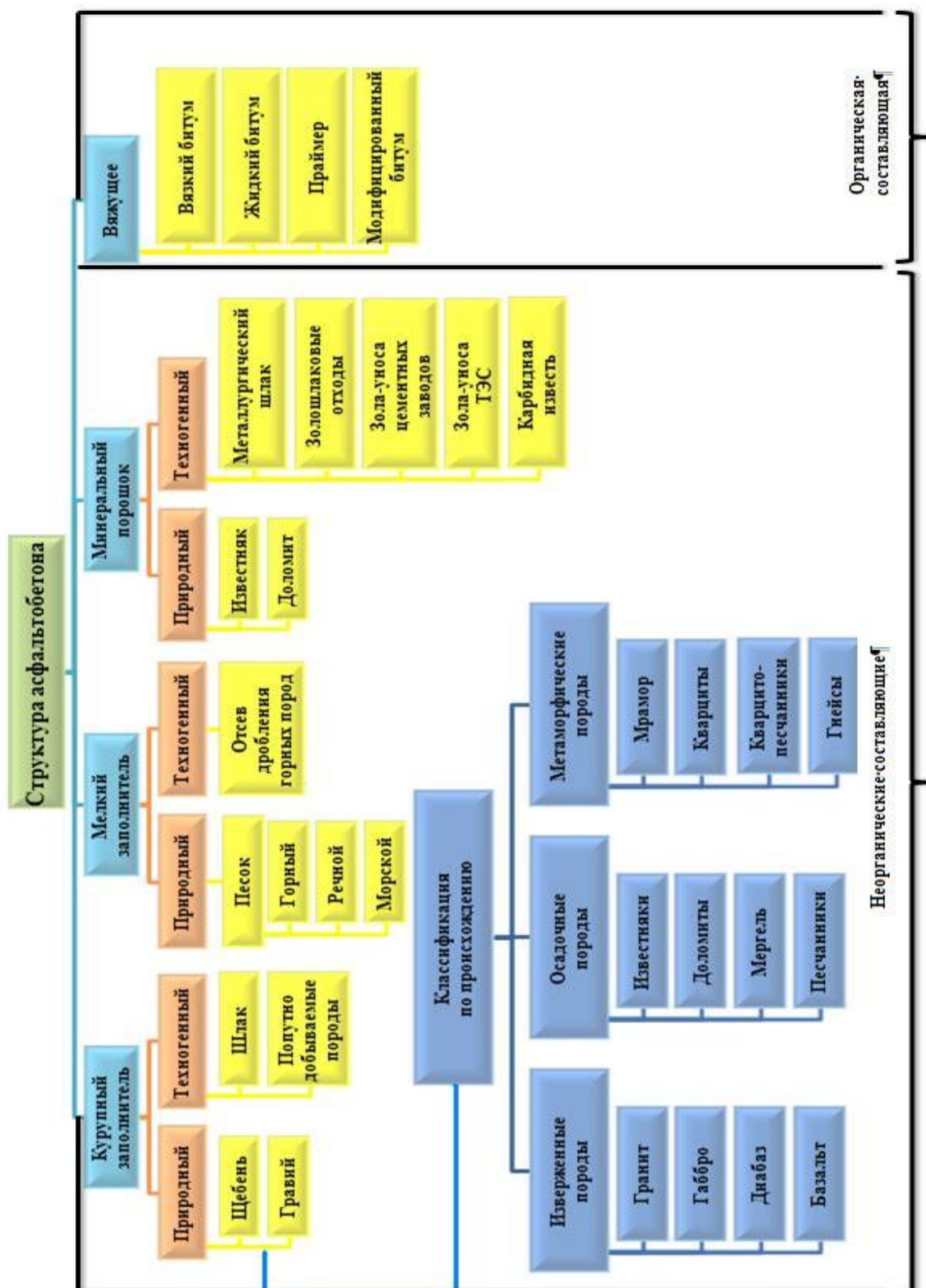


Рисунок 1.3 – Структура асфальтобетона



Рисунок 1.4 – Свойства каменного материала

Для устройства нижних слоев покрытия и слоев основания целесообразно применять крупнозернистую асфальтобетонную смесь с использованием щебня из горных пород и металлургических шлаков прочностью не менее 40–60 МПа, с размером зерен 5–35(40) мм. Объясняется это тем, что нижний слой покрытия и слои основания испытывают меньшую нагрузку от движущегося транспорта и от воздействия атмосферных факторов, требования к прочности камня снижают на 20–25 %.

К щебню для асфальтобетонных смесей, используемых при устройстве верхнего слоя покрытия, предъявляют более жесткие требования. Щебень должен иметь предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии не менее 80–100 МПа, размер зерен 5–10, 5–15 или 5–20 мм. Зерна крупного заполнителя должны быть чистыми и иметь форму близкую к кубу или тетраэдру –это обеспечит меньшее потребление битума и более высокую плотность, прочность и сдвигоустойчивость асфальтобетона.

Наибольшее распространение в дорожном строительстве получили изверженные породы – граниты, габбро, диабазы, андезиты, трахиты и др. (рисунок 1.3), которые являются кислыми по химическому составу, но обладают довольно высокими прочностными характеристиками [17]. Осадочные же породы – извест-

няки, доломиты, мергель и песчаники обладают относительно низкими показателями по прочности и морозостойкости, но из-за лучшего взаимодействия их поверхности с битумом могут обеспечить более высокие показатели асфальтобетона по прочности [25].

Применение метаморфических пород, образующихся в результате глубокого изменения изверженных и осадочных пород под действием высокой температуры и давления, ограничено. В случае с кварцитом это объясняется необходимостью его активации, в виду слабого сцепления с битумом. Гнейсы и сланцы образуют при дроблении на щебень повышенное количество зерен лещадной (плоской). При уплотнении катками щебень такой формы ломается, и в изломе покрытие становится водопроницаемым, неморозостойким и быстро разрушается [26]. Мрамор является дорогостоящим материалом и используется в декоративном строительстве [17].

Стоит отметить, что применение местного сырья и отходов промышленности в качестве каменных материалов для производства асфальтобетона может значительно расширить номенклатуру минерально-сырьевой базы дорожно-строительных материалов. Так комплексные исследования учеными из Омска и Бурятии показывают возможность применения эффузивных пород, в частности вулканического туфа [27], и керамзита в качестве крупного заполнителя [28, 29].

Огромный интерес в качестве сырья для дорожного строительства представляют крупнотоннажные техногенные отходы [30, 31]. Исследования в этой области более 40 лет ведутся научными коллективами БГТУ им. Шухова. Одним из крупнейших источников таких материалов является горнодобывающая промышленность. Учеными БГТУ им. В.Г. Шухова были получены асфальтобетоны с улучшенными физико-механическими характеристиками на основе кварцитопесчаников Курской магнитной аномалии (КМА) [32]. Изучена также возможность использования отсеков дробления железистых кварцитов и сталеплавильных шлаков в качестве крупного заполнителя [33–36]. А.М. Гридчиным и научно-исследовательской группой под его руководством разработаны основы применения анизотропного сырья КМА при строительстве автомобильных дорог [34]. Так

в рамках программы «Развитие дорожной сети в сельских населенных пунктах Белгородской области и их благоустройство на 1999–2005 гг.» было строительство дорог с покрытием из асфальтобетона на основе местного щебня, полученного на дробильно-сортировочной фабрике Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОКа) из попутно-добываемых метаморфических сланцев, а также из отходов сухой магнитной сепарации. Асфальтобетоны с применением такого крупного заполнителя отличаются высокой плотностью и малым значением набухания.

Не остались без внимания и отходы металлургического производства в виде отвалных шлаков. Асфальтобетонные покрытия с их применением характеризуются высокой прочностью, устойчивостью к истиранию, большим коэффициентом сцепления, отсутствием сдвиговых деформаций. Это объясняется изменением структуры шлаков при взаимодействии с водой – поры шлакового материала прорастают кристаллогидратными новообразованиями, что предотвращает в последующем доступ в них воды и приводит к повышению морозостойкости конструкции [33]. Существует положительный опыт применения фосфорных шлаков в качестве минеральной части асфальтобетонов [37].

Возможно применение цветных заполнителей для асфальтобетонов, что позволяет создавать покрытия определенных цветов на основе цветных пластбетонов, не уступающих по эксплуатационным характеристикам традиционным асфальтобетонам [38].

В качестве мелкого заполнителя для приготовления асфальтобетона применяют пески (рисунок 1.3) как природные (горные, речные, морские), так и техногенные (отсевы дробления горных пород). Как в случае с крупным заполнителем, так и с мелким – наиболее эффективно применение песков с остроугольными частицами, которые чаще всего являются представителями горных песков.

В асфальтобетонной смеси песок выступает в роли заполнителя порового пространства между зернами крупного заполнителя, а также повышает плотность асфальтобетона [15]. Требования к песку для приготовления асфальтобетонных смесей приведены в ГОСТ 9128–2013 [24].

Отличительной чертой большинства песков является их состав, характеризующийся в основном содержанием кварца и полевых шпатов. Однако иногда отмечается присутствие минералов группы гранатов, которые обладают вяжущими свойствами и в процессе приготовления асфальтобетонной смеси проявляют свойства близкие цементу. Это приводит к увеличению прочностных характеристик асфальтобетона, его твердости и плотности [39].

Природные пески должны быть полидисперсными. Применяя только природный песок в асфальтобетонных смесях целесообразно использовать крупно- или среднезернистый с модулем крупности, соответственно, более 2,5 или в пределах 2,0–2,5 и содержанием зерен крупнее 0,63 мм в пределах 35–50 %. Крупность зерен песка определяет плотность асфальтобетона и деформативную устойчивость. И, чем крупнее песок, тем плотнее структура асфальтобетона и выше его деформативная устойчивость.

Используя же дробленые пески в составе асфальтобетонных смесей необходимо помнить, что получать их предпочтительно из невыветрелых и некарбонатных горных пород или кристаллических металлургических шлаков с характеристиками по прочности не ниже, чем у щебня для асфальтобетона [18].

В целях улучшения подвижности смеси и физико-механических свойств асфальтобетона дробленный песок или отсеvy дробления иногда смешивают с природным окатанным песком в соотношении 1:1 или 2:1.

Широкое распространение, в последние годы, получило использование техногенных песков [40]. Они представляют собой энергосберегающее сырье, которое в силу специфики генезиса и техногенеза позволяют получать высокоэффективные строительные композиты.

Гранулированные топливные шлаки, так же представляют интерес для дорожно-строительной отрасли. Но применение их в качестве мелкого заполнителя асфальтобетона требует предварительной активации поверхности. В силу кислой природы [33].

Имеется положительный опыт использования легких пористых материалов (вспученный вермукулит, отсеvy дробления керамзита) в качестве мелкого запол-

нителя асфальтобетона [41–44]. Введение этих материалов в асфальтобетон позволяет повысить его сдвигоустойчивость и трещиностойкость.

Как известно, качество асфальтобетонной смеси, а, следовательно, асфальтобетонного покрытия, во многом определяется структурно-механическими характеристиками асфальтовяжущего [45], которое представляет собой бинарную систему органического вяжущего (битума) и минерального порошка.

В качестве минерального порошка используют различные материалы, требования к которым обозначены в ГОСТ Р 52129–2003 [46]. Функциональное назначение минерального порошка состоит в заполнении пор между более крупными частицами и создании вместе с битумом асфальтовяжущего вещества, повышая его вязкость и клеящую способность в составе асфальтобетона. Благодаря большой площади адсорбирующей поверхности минеральный порошок придает асфальтобетону требуемые характеристики прочности и устойчивости. Применение минерального порошка позволяет снизить температуру выпускаемой смеси и повысить ее удобоукладываемость.

Традиционно для производства асфальтобетона применяют минеральные порошки карбонатного состава. Как правило, их получают путем дробления природного сырья – карбонатных горных пород различного генезиса. На их долю в осадочной оболочке Земли приходится около 14 %. По снижению частоты использования наиболее распространенные породы, в которых породообразующим минералом является кальцит, можно расположить в следующей последовательности: известняк, мел, мрамор.

Качественные карбонатные породы, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 52129–2003 [46], с одной стороны имеются не во всех регионах страны, а с другой, используются в других отраслях промышленности и являются достаточно дорогостоящими. Поэтому в технологии производства асфальтобетонов широко применяются отходы различных видов производств [47–49], удовлетворяющих по составу, дисперсности и другим физико-механическим характеристикам, предъявляемым к минеральным порошкам. К наиболее востребованным, и хорошо изученным можно отнести высокодисперсные механогенные (отсевы дробления, в

том числе с пылеулавливающих фильтров) [50] и пирогенные отходы (отходы предприятий по производству извести – частично обожженные карбонатные породы с фильтров; золошлаковые отходы).

Таким образом, анализ проводимых исследований показал, что ввиду того, что дорожно-строительная отрасль является наиболее крупнотоннажной отраслью промышленности Российской Федерации, в которой, в соответствии с государственными стратегиями развития намечено увеличение темпов строительства, ремонта и реконструкции автомобильных дорог, особо остро стоит вопрос качества и доступности основных дорожно-строительных материалов, что напрямую связано с высокой материалоемкостью данной отрасли промышленности.

Разведанные запасы качественного сырья, которое могло бы быть использовано в качестве составляющих асфальтобетона, неуклонно уменьшаются, поэтому необходимо проводить поиск альтернативных источников сырья для дорожно-строительных материалов и изучать возможность их модификации. В связи с этим обстоятельством наиболее эффективно использование местных сырьевых ресурсов – отходов промышленного производства, что выступит одним из решений проблемы сырьевых материалов неорганического происхождения.

Что же касается органической части асфальтобетона, традиционно для производства органоминеральных композитов для дорожного строительства применяют битум. Эксплуатационные характеристики битума определяются химическими и физическими свойствами компонентов. Пригодность нефти для производства битумов определяется содержанием в нефти серы, плотностью, вязкостью и групповым составом исходной нефти. Для производства битумов возможно использование высокосмолистых, смолистых и малопарафиновых разновидности нефти. Чем больше соотношение «асфальтены / смолы», тем лучше эксплуатационные свойства битумов.

При смешении с каменным материалом, битум должен обладать вязкостью, достаточной для покрытия поверхности этого материала, но не должен быть слишком жидким, иначе он может стечь с поверхности каменных материалов при транспортировке или хранении. Вязкость должна также соответствовать требова-

ниям укладки и уплотнения. Вяжущее должно обеспечивать устойчивость для предотвращения чрезмерной деформации, но оно должно быть и достаточно пластичным, чтобы противостоять образованию трещин. Адгезионные свойства вяжущего определяет то, какое количество каменного материала может быть вынесено с поверхности (выкрашивание) [51].

Битум для дорожного строительства должен отвечать требованиям ГОСТ 22245–90 [52], а его количество в зависимости от марки смеси регламентируют требования ГОСТ 9128–2013 [24].

В теории соответствие качества дорожного битума ГОСТ 22245–90 должно гарантировать стабильность и эксплуатационную надежность дорожного покрытия на рассчитанный период времени. Но как показывает практика, не смотря на соответствие качества битума требованиям ГОСТ 22245–90, эксплуатационные характеристики асфальтобетонного покрытия ухудшаются уже в первые годы. Основной причиной такого эффекта является использование доступных минеральных материалов, отвечающих требованиям по прочности, но с низкой активностью по отношению к битуму. Решение данной проблемы возможно за счет полной или частичной замены минеральной части асфальтобетона, однако в связи с ограниченностью минерального сырья, стоит акцентировать внимание на повышении качества битума, которое теоретически можно осуществить несколькими способами. Первый предполагает внесение серьезных изменений в процесс технологии получения дорожных битумов, что практически невозможно в связи с необходимостью полного перевооружения нефтеперерабатывающих заводов. Второй способ предполагает модифицирование вяжущих посредством введения разного рода добавок органического и неорганического происхождения для достижения требуемых свойств битума. Классификация добавок, вводимых в битум, представлена на рисунке 1.5.

Модификация вяжущего посредством введения добавок органического происхождения, получивших широкое применение, показывает отличные результаты. Однако для достижения поставленной цели, которой является улучшение отдельных свойств битума, возможно введение и неорганических веществ в качестве

модификаторов. Данный способ ещё мало изучен, однако науки уже известны положительные результаты, заключающиеся в увеличении вязкости битумов, прочности на растяжение, водостойкости, стойкости к остаточным деформациям, а также сопротивления колееобразованию.



Рисунок 1.5 – Классификация добавок для модификации битума

Подводя итог компонентного состава асфальтобетонной смеси, стоит отметить, что обязательным условием получения качественных асфальтобетонных смесей и придания им особых свойств в настоящее время является введение добавок, целью которых является улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетона, в том числе повышение долговечности и качества дорожного покрытия, а также повышение сдвигоустойчивости при высокой температуре. Классификация добавок, вводимых в асфальтобетонную смесь, приведена на рисунок 1.6.

Классификация предполагает их деление на 3 группы в зависимости от происхождения: природные, синтезированные и техногенные отходы промышленно-

сти, которые в соответствии с классификацией по составу разделяют на органические и неорганические добавки.



Рисунок 1.6 – Классификация добавок, вводимых в асфальтобетонную смесь

Введение добавок приводит к улучшению эксплуатационных характеристик асфальтобетона, и решение о введении отдельных индивидов принимается в индивидуальном порядке при проектировании состава асфальтобетонной смеси.

Таким образом, одной из основных проблем, возникающих при приготовлении асфальтобетонной смеси, выступает отсутствие запасов кондиционного сырья на территории нашей страны, а, следовательно, возможное удорожание стоимости смеси за счет транспортных расходов при калькулировании стоимости её составных компонентов. Решением данной проблемы является использование некондиционных природных материалов различного строения и генезиса, а также отходов промышленности, предполагая возможность частичной или полной замены традиционных составляющих асфальтобетонной смеси, применение, как основных, так и кислых пород в качестве сырья для производства асфальтобетона.

Другим путем решения данной проблемы является модифицирование вяжущего, которое возможно осуществить несколькими путями. Первый предполагает внесение изменений в процесс перегонки нефти, однако в связи с тем, что это

требует кардинального переоснащения заводов он не нашел широкого применения. Второй путь предполагает модификацию вяжущего посредством введения разного рода наполнителей, из которых широкое применение получили органические добавки, показывающие отличные результаты. Однако для достижения поставленной цели возможно введение неорганических компонентов в качестве модификаторов, что позволит расширить сырьевую базу дорожных асфальтобетонов и корректировать свойства вяжущего в зависимости от типа добавки. Данный способ имеет преимущество в связи с простотой осуществления, однако необходимо четкое понимание процессов, происходящих при введении добавок в битум для возможности корректировки состава и свойств конечного продукта и влияния на желаемые результаты.

1.2. Повышение качества применяемых битумов

Повышение эффективности дорожно-строительных материалов позволяет существенно увеличить срок службы асфальтобетонных покрытий и защитных слоев, так как основными требованиями к таким покрытиям являются устойчивость к воздействию суточных и сезонных температурных циклов и максимальное сопротивление усталостным разрушениям. При этом, вяжущее, применяемое для производства дорожно-строительных композитов, являясь термопластичным материалом, определяет деформативную устойчивость покрытия при перепаде температур под воздействием динамических нагрузок (сдвиг и др.) [53].

Как уже отмечалось ранее, традиционно для производства асфальтовых бетонов в качестве вяжущего компонента применяют нефтяные (искусственные) битумы, получившие широкое распространение в конце 20 г. XX в. Битумом принято называть твердый или смолоподобный продукт, представляющий собой сложную смесь высокомолекулярных углеводородов и их неметаллических производных (азота, кислорода и серы), а также металлов (ванадия, железа, никеля, натрия) [54–57]. В зависимости от способа получения различают два вида нефтяных (искусственных) битумов:

1) *остаточные* вязкие битумы, полученные посредством отгона фракций, выкипающих до 300–350 °С;

2) *окисленные* вязкие битумы, полученные путем окисления кислородом воздуха остаточных фракций нефтепереработки при температуре 240–250 °С.

Остаточные битумы отличаются хорошей погодоустойчивостью, и, в сравнении с окисленными битумами, обеспечивают высокое качество дорожных композитов, но для их производства необходимо использовать тщательно отобранные тяжелые асфальтосмолистые нефти, четко соблюдать температурный режим и скорость перегонки [54, 58]. Однако запасы тяжелой нефти в России не могут полностью обеспечить дорожно-строительную отрасль необходимым количеством органического вяжущего с требуемыми характеристиками.

Окисленные же битумы, традиционно применяемые у нас в стране для производства асфальтовых композиций, обладают более широким диапазоном рабочих температур (т.е. относительно высокая температура размягчения и относительно низкая температура хрупкости). Однако длительность окисления при повышенных температурах неблагоприятно влияет на свойства получаемых битумов, в частности снижение адгезии, повышение температуры хрупкости, склонность к старению и т.п.

Важно отметить, что качество как остаточных, так и окисленных битумов определяет природа перерабатываемой нефти, химический состав и структура углеводородных соединений, входящих в ее состав [59].

К сожалению, битум долгое время не считался в нашей стране целевым продуктом нефтепереработки, поэтому совершенствованию технологии его производства не уделялось должного внимания. Соответственно, качество получаемого органического вяжущего и объем его производства не удовлетворяют требованиям современного рынка [60]. Битумы, выпускаемые отечественными заводами, обладают некоторыми недостатками: узкий интервал пластичности и низкий комплекс основных свойств.

Учитывая, что на практике, применение органического вяжущего даже самого высокого качества не всегда может гарантировать качество и долговечность

асфальтобетона, а также сложные условия эксплуатации дорожных покрытий, особенности состава и свойств минеральной части битумоминеральных композиций, специфика состава и свойств производимых битумов вызывают потребность в модифицировании битума с целью улучшения свойств асфальтобетона, что является перспективным направлением в дорожном строительстве [61, 62].

Большой вклад в изучение особенностей и свойств модифицирующих добавок внесли А.С. Колбановская, В.В. Михайлов, А. Дж. Хойберг, М.И. Кучма, И.В. Королев, А.П. Платонов, Л.М. Гохман и др. [56, 65–66]. Данные о составе и свойствах, назначении и области применения добавок позволяют привести их классификацию (рисунок 1.7) [67]. В соответствии с классификацией добавки разделяют по трем основным признакам: вещественному составу, функциональному назначению и по наименованию основных компонентов. В свою очередь модифицирующие добавки по наименованию основных составляющих делят на три группы. К первой относятся **минеральные**: асбестовые, шлаковые, цементные, известковые, фосфорсодержащие, серосодержащие и т.д. Представителями второй группы являются **низкомолекулярные органические**: аминные, амидные, амидоаминные, имидазолиновые и т.д. Третьи – **высокомолекулярные (полимерные) органические**: полиизобутилдиеновые, дивинилстирольные и т.д.

Номенклатура модифицирующих добавок, применяемых в нашей стране в соответствии с классификацией по функциональному назначению довольно разнообразна (таблица 1.1).

Как правило, использование модифицирующих добавок направлено на изменение одной или нескольких характеристик битумов и материалов на их основе: снижение вязкости, повышение вязкости, снижение хрупкости, улучшение пластичности, улучшение сцепления с каменными материалами, структурирование битума и эмульгирование битума (в случае получения битумной эмульсии).

В соответствии с приведенной номенклатурой (таблица 1.1) добавки можно разделить по количеству получаемых функциональных эффектов на монофункциональные, бифункциональные и полифункциональные (комплексного действия).

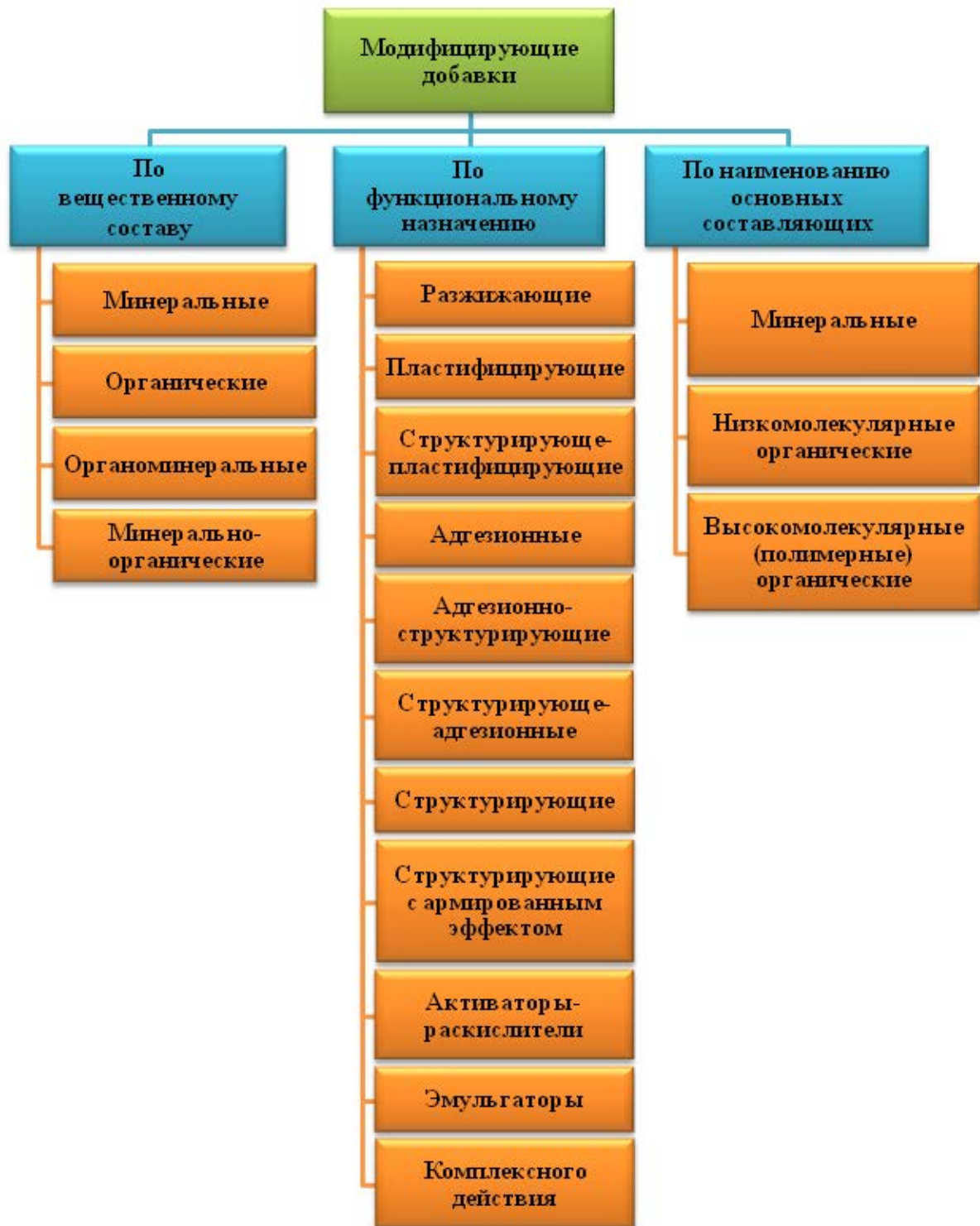


Рисунок 1.7 – Классификация добавок для модифицирования битума

К **монофункциональным** относят разжижающие, адгезионные и эмульгаторы. **Бифункциональные**: пластифицирующие, адгезионно-структурирующие, структурирующе адгезионные, структурирующие, структурирующие с армирующим эффектом и структурирующие с противогололедным эффектом. **Полифунк-**

цинальными по количеству функциональных эффектов являются структурирующие пластифицирующие и активаторы раскислители.

Введение разжижающих добавок бензина, лигроина, керосина, дизельного топлива в битум в количестве 2–50 % приводит к снижению вязкости. Введение в битум пластифицирующих добавок антраценового масла, индустриального масла, сырья для производства битумов (гудрона) в количестве 2–40 % приводит к уменьшению хрупкости, улучшению пластичности битума и материалов на его основе. Введение структурирующе-пластифицирующих добавок ДСТ-30, «Финапрен», «Кратон» с расходом 1,5–3 % совместно с 0,5–1,5 % масла индустриального, а также дроблёной резины, добавки РТЭП в количестве 5–6 % увеличивает вязкость, снижает хрупкость, улучшает пластичность. Введение адгезионных катионактивных добавок в количестве 0,5–2 % улучшает его сцепление с каменными материалами. Адгезионно-структурирующие и структурирующе-адгезионные модифицирующие добавки Техпрогресс-Т, МорЛайф 3300, ПэйвБондЛайт, АСД-БР/П, ПМД-П/БР при введении в битум в количестве 0,3–2 % увеличивают вязкость и улучшают сцепление с каменными материалами [67, 68–70].

Структурирующие добавки полифосфорной и ортофосфорной кислоты, известнякового порошка, побочных продуктов различных производств структурируют битум, увеличивая его вязкость. Структурирующие с армирующим эффектом – асбестовые, полимерные, целлюлозные волокна – при введении в битум в количестве 5–10 % увеличивают вязкость, упрочняют структуру. Структурирующие добавки с противогололёдным эффектом в процессе эксплуатации материалов на основе битума позволяют предотвратить образование на их поверхности слоя льда. Применение извести и цемента как активаторов-раскислителей в битум в количестве 5–10 % приводит к раскислению битума, улучшению сцепления с каменными материалами, появлению в структуре битума элементов и участков кристаллической структуры. Эмульгаторы «Амдор-ЭМ», «Белэм-Б», добавки фирмы «СЕКА» на основе азотсодержащих катионактивных ПАВ обеспечивают процесс эмульгирования битума [67, 68].

Таблица 1.1 – Номенклатура модифицирующих добавок в соответствии с классификацией по функциональному назначению [58]

№ п/п	Функциональное назначение	Характер изменения свойств битума или материалов на его основе	Название добавок	Примерный расход, % от массы битума	Характеристики добавок по другим классификационным признакам
1	Разжижающие	снижение вязкости	бензин лигроин керосин дизельное топливо	2–50	органические жидкие
2	Пластифицирующие	уменьшение хрупкости, улучшение пластичности	антраценовое масло индустриальное масло, сырье для производства битумов	2–40	органические жидкие и вязкотекучие
3	Структурирующие пластифицирующие	увеличение вязкости, снижение хрупкости, улучшение пластичности	ДСТ-30 «Финапрен» «Кратон» совместно с маслом индустриальным дробленая резина: Rouse, Rubber Baker РТЭП	1,5–4 1,5–4 1,5–4 0,5–1,5 2–4 2–4 5–6	органические гранулированные блоксополимеры бутадиена и стирола типа СБС –//– пластифицирующие жидкие полимерные порошковые –//– многокомпонентная органоминеральная гранулированная
4	Адгезионные	улучшают сцепление с каменными материалами	БС-КСП «Амдор-9» Дорос-АП DINORAM CEKABASE POLIRAM СОНДОР «Белэм-Д» «Адгезол» Пеназолин Бикор Амидан КАДЭМ-ВТ	0,5–1,5 0,5–1,5 1,0–2,0 0,5–1,5 0,5–1,5 0,5–1,5 0,5–1,5 0,5–1,5 0,5–1,5 0,5–1,5 0,3–2	азотсодержащие катионактивные –//– –//– –//– –//– –//– –//– –//– –//– –//–

№ п/п	Функциональное назначение	Характер изменения свойств битума или материалов на его основе	Название добавок	Примерный расход, % от массы битума	Характеристики добавок по другим классификационным признакам
5	Адгезионно- структурирующие	улучшают сцепление с каменными материалами, увеличивают вязкость	Техпрогресс-Т МорЛайф3300 ПэйБондЛайт АСД-БР/П	0,5–1,5 0,3–1,5 1–2	низкомолекулярная полимерная полимерная фосфорсодержащая
6	Структурирующие адгезионные	увеличивают вязкость, улучшают сцепление с каменными материалами	ПМД-П/БР	1–2	на основе синтетического каучу- ка
7	Структурирующие	увеличивают вязкость, структурируют битум	полифосфорная кислота ортофосфорная кислота известняковый порошок побочные продукты различ- ных производств	0,1 0,1 40–50 10–30	органические жидкости –//– минеральные порошковые наполнители органические жидкие, вязкопла- стичные, твердые
8	Структурирующие с армирующим эффектом	увеличивают вязкость, упрочняют структуру	асбестовые волокна: хризотол полимерные волокна: полипропиленовые Petro Fibers целлюлозные волокна: Viatop	5–10 5–10 5–10	волокнистые наполнители фиб- роволокна стабилизаторы ЩМА
9	Структурирующие с противогололёдным эффектом	увеличивают вязкость, структурируют битум	Грикол	40–50	минеральные порошковые наполнители с водорастворимы- ми солями
10	Активаторы-раскислители	увеличивают вязкость, структурируют битум, улучшают сцепление с каменными материалами	известь цемент	5–10	минеральные порошковые наполнители
11	Эмульгаторы	обеспечивают процесс эмульгирования битума	«Амдор-ЭМ» «Белэм-Б» DINORAM CEKABASE POLIRAM STABIRAM	0,3–2 0,3–2 0,3–2	азотсодержащие катионактивные и анионактив- ные –//–

Таким образом, количество применяемых в дорожно-строительной отрасли добавок для модификации битумов достаточно велико. Однако, несмотря на то, что они позволяют регулировать ряд свойств вяжущих, их использование приводит к значительному удорожанию битума. В связи с этим российские и зарубежные специалисты в области дорожно-строительных материалов рассматривают возможность применения альтернативных материалов в качестве модифицирующих добавок (как органического, так и неорганического происхождения) и методов модификации дорожных битумов.

В ряде работ [71, 72] рассмотрена возможность использования смолы пиролиза (СП) как сырья для модификации битума. Дело в том, что СП представляют собой липкую вязкую массу темно-коричневого цвета, нерастворимую в воде, хорошо растворимую в органических растворителях и легко смешивающуюся с битумом в любых соотношениях. В их составе присутствуют фенольные соединения, полифенольные, карбоновые кислоты, их эфиры, нейтральные соединения и другие, имеющие функциональные группы, характерные для ПАВ. Анализ показателей сцепления исходного битума и битума, модифицированного СП, позволяет сделать вывод о том, что введение смол пиролиза в битум, также как ПАВ любого класса, может снизить поверхностное натяжение между жидкой и твердой фазой, т.е. улучшить адгезию битума. Изучение физико-механических свойств асфальтобетонных образцов с использованием модифицированного вяжущего показало, что все образцы асфальтобетона соответствуют ГОСТу 9128–2013, а по прочностным показателям в сухом и водонасыщенном состоянии (после кратковременного – 1 сут. и длительного водонасыщения – 15 сут.) превосходят требования нормативных документов.

Также в настоящее время в дорожном строительстве используется большое количество побочных продуктов нефтехимии, например, смолы пиролиза, инденкумароновые смолы, кислые гудроны или кубовые остатки производства синтетических жирных кислот (КОСЖК).

Кислые гудроны образуются в результате очистки нефтяных масляных фракций концентрированной серной кислотой с целью удаления смолистых ве-

ществ. Но из-за высокого содержания в своем составе серной кислоты, вызывающей коррозию применяемого оборудования, и из-за низкого содержания выделяемого вяжущего данные материалы не получили развития. Однако нейтрализованный кислый гудрон нашел своё применение в качестве компонента дорожного битума, но скорее в целях увеличения выхода битума без улучшения качества вяжущего [73].

Учеными изучена возможность использования КОСЖК в качестве анионной добавки к битуму в количестве 3–5 % или в качестве добавки улучшающей реологические свойства вяжущего при введении 10–30 % добавки.

Другой альтернативной добавкой является полимеризат из кубовых остатков производства синтетических жирных кислот, он обладает хорошей адгезией к каменным материалам и хорошо смешивается с битумами. Его высокая вязкость не позволяет использовать его как самостоятельное вяжущее, но введение его в битум в количестве 40–65 % (в зависимости от вязкости битума) дает возможность получать вяжущее с повышенной температурой размягчения, более широким интервалом пластичности и значительно более высокими адгезионными свойствами [73].

В направлении структурирования битума в конце XX века была разработана технология получения полимерно-битумных композиций. Получают полимерно-битумное вяжущее (ПБВ) путем введения в битум небольшого количества (2–6 %) блоксополимеров бутадиена и стирола типа СБС (дивинилстирольные термоэластопласты и другие зарубежные аналоги) [74]. Асфальтобетоны с использованием ПБВ отличаются повышенной деформативностью при отрицательных температурах и упругостью при положительных температурах, а также повышенной устойчивостью к многократным динамическим воздействиям.

Таким образом, можно говорить об эффективности использования ПБВ в дорожном строительстве [75], но, несмотря на положительный эффект от применения таких вяжущих, производство ПБВ в масштабах страны не получило широкого распространения. Дело в том, что получение ПБВ представляет собой довольно сложный производственный процесс, требующий значительных затрат,

технологического оснащения и специалистов. Стоит отметить, что неиспользуемый продукт имеет свойство расслаиваться в течение нескольких суток, поэтому необходим отлаженный механизм реализации [61].

В виду образования большого количества отходов в виде изношенных шин популярным становится модифицирование битумов с применением продуктов их переработки [76–80]. В настоящее время, как в России, так и за рубежом ведутся исследования с целью получения нефтяного дорожного битума с повышенными физико-механическими показателями путем разработки оборудования и новых технологий. Получение резинобитумного вяжущего заключается в смешении резинового порошка с битумом. Например, исследования [77] некондиционного битума марки БНД 60/90 с использованием резиновой крошки показывают, что при введении добавки замедляется процесс старения и окисления битума за счет содержания в резине антистарителей и антиоксидантов. Кроме того, введение модификатора в количестве 6 % существенно улучшает эксплуатационные характеристики битумно-резиновой композиции (температура размягчения, дуктильность, эластичность, температура хрупкости), при этом сохраняется марка исходного битума. Однако использование резиновой крошки приводит к удорожанию конечного продукта (асфальтобетона) в среднем на 30 %.

Сера в качестве модифицирующей добавки к битуму применяется довольно давно. В России до 60-х годов XX в. использование серы, как модификатора битума, не представляло интерес в виду достаточных, на тот момент, запасов сырой нефти и большого спроса на серу [81]. С 1970 г. отмечается развитие применения серы при строительстве дорог в США, Канаде и некоторых странах Западной Европы: Финляндии, ФРГ, Франции. Рост стоимости нефтяных битумов и увеличение производства серы из вторичных источников сырья, приводящее к снижению ее стоимости, явились основными причинами изучения возможности использования серы как модификатора битума [73, 82–84].

И.М. Руденская [85], обобщив иностранный опыт применения серы в дорожном строительстве, выделила три направления использования серы:

- 1) введение серы в битум в количестве $<20\%$ для получения серо-битумного вяжущего для производства асфальтобетона и др.;
- 2) введение серы в битум в количестве $>20\%$, как активного наполнителя в вяжущем;
- 3) пластификация серы органическими пластификаторами с полной заменой битума.

Наиболее широкое распространение получило первое направление.

Температура приготовления серо-битумного вяжущего ограничивается пределом от 120 до 150 °С и зависит от количества серы. Предельное количество серы в составе вяжущего зависит от содержания ароматических углеводородов в мальтеновой части битума, которые наиболее активно растворяют серу [54].

Исследования И.М. Руденской и Д.А. Синьшинова [60, 85] показывают, что низкое содержание серы в вяжущем позволяет изменять реологические свойства битума, а высокое – имеет значительное влияние на механические свойства серо-битумного вяжущего.

В результате проведенных исследований о влиянии серы на свойства битума авторы указывают на улучшение эксплуатационных характеристик серо-битумного вяжущего (адгезия, пенетрация, температура размягчения), в конечном итоге улучшает и свойства асфальтобетона на основе серобитумного вяжущего усталостную долговечность асфальтобетона, что, в свою очередь, положительно влияет на долговечность асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

Однако, не смотря на улучшение свойств вяжущего и возможность его экономии до 30 %, при производстве серобитума возможно выделение вредных веществ, портящих оборудование и загрязняющих окружающую среду.

В последние годы актуализируется использование нанотехнологий в дорожном строительстве [76, 85, 86]. Так в работах многих ученых, в том числе научных школ БГТУ им. Шухова [86–90], рассматривается возможность получения вяжущего для дорожного строительства наноструктурированного одностенными углеродными нанотрубками с последующим введением его в битум. Целью исследований является получение высокооднородного битумного вяжущего, об-

ладающего высокими физико-механическими свойствами. В результате авторы указывают на высокие показатели когезии, эластичности, адгезии, температуры размягчения и низкие показатели температуры хрупкости.

За рубежом также актуальна тема наноматериалов в дорожных композитах. Так в качестве наномодификатора предложено использование наноглины в комплексе с полимерными добавками к битуму. Использование этой комплексной добавки позволяет повысить температуру размягчения битума [91].

В настоящее время зарубежными учеными накоплено большое количество трудов в области структурирования органических вяжущих минеральными тонкодисперсными наполнителями. В качестве наполнителей предложено использовать разнообразные материалы: наноглины (данный термин приводится в авторской редакции [91], однако мы не считаем его правомерным с точки зрения терминологии), золы-уноса, углеродные добавки, монтмориллонит, бетонит и др. С помощью этих материалов можно модифицировать органические вяжущие, улучшая физико-механические свойства асфальтовых композиций, в частности стабильность, модуль упругости и прочности при растяжении [92–99].

Большой опыт накоплен в области использования минеральных наполнителей в качестве модифицирующих агентов, представляющих собой неорганические продукты, которые при смешении с битумом сохраняют свою первоначальную форму и размеры, не проявляют в этой смеси коллоидных свойств и не вступают с ним в реакцию. В качестве наполнителей для асфальтовых композиций используют широкий спектр материалов природного и техногенного происхождения. Традиционно наиболее востребованным сырьем для получения минеральных наполнителей является известняк. Однако с целью оптимизации производства и снижения себестоимости асфальтобетонов в качестве его компонентов могут применяться горные породы и отходы различного минерального состава: кварцитопесчаник, диабаз, сиенит, кремнезем, нефрит, гранит, сланец, доломит, зола-уноса, базальт, полевой шпат, шлаковая зола паровых котлов, аргиллит, асбест, дацитный порфир, устричные раковины, слюда и многое другое [65, 100].

Использование подобных материалов, как правило, направлено на улучшение физико-механических характеристик, однако иногда наполнители вызывают два нежелательных эффекта: повышение влагопоглощения и снижение пластичности многих битумных композиций. Последнее обстоятельство может иногда компенсироваться повышенной прочностью и меньшей хрупкостью битума, в связи с чем, необходимо тщательно подходить к выбору того или иного материала, применяемого в качестве наполнителя.

Группой ученых США университета Висконсина Милуоки во главе с К.Г. Соболевым ведутся исследования по возможности использования высококальциевых и низкокальциевых зол-уноса в качестве наполнителей органических вяжущих для битумоминеральных композиций для дорожного строительства [101, 102]. В результате получены вяжущие обладающие повышенной трещиностойкостью и сопротивлением сдвигу, что в конечном итоге позволит получить асфальтобетоны с более широким интервалом рабочих температур. Таким образом, золы-уноса зарекомендовали себя как перспективные добавки к органическому вяжущему, имеющие низкую стоимость, но позволяющие при этом, косвенно, повысить марку битума без удорожания. Однако степень эффективности применения зольных отходов, как структурирующей добавки к битуму для дорожного строительства определяется их составом и строением, изучению которых, при разработке составов органоминеральных композиций не всегда уделяется должное внимание.

С целью повышения структурированности и стабильности свойств органических вяжущих в процессе эксплуатации вводят добавки в виде минеральных или органических волокон, которые являются разновидностью наполнителей. Применение волокнистых наполнителей для модификации битумов позволяет повысить структурированность вяжущего, его вязкость, трещиностойкость, прочность дорожно-строительных композитов на растяжение и сдвигоустойчивость [73]. Наиболее распространенными представителями волокнистых наполнителей являются целлюлоза, стекловолокно, асбест (асбоотходы), полиэстер и полипропиленовая фибра [62].

В исследованиях А.М. Мухаметханова, О.К. Нугманова, Н.А. Лебедева [103] рассмотрено влияние волокон растительного происхождения (беленые целлюлозные волокна, небеленые целлюлозные волокна, техническая целлюлоза, целлюлозные волокна льна и целлюлозные волокна рапса) на свойства органического вяжущего. Установлено, что добавки на основе целлюлозных волокон в равной степени изменяют пластичность битума по показателю дуктильность. Стабилизатор на основе целлюлозных волокон рапса в композиции с госсиполовой смолой позволяет увеличить температуру размягчения органического вяжущего по КиШ на 6–12 °С, а также повышает индекс пенетрации вяжущего с –0,4 до +1,4.

Использование асбеста в битумоминеральных композициях в количестве 1,5–3 % приводит к увеличению расхода битума 0,5–1 %, но при этом возрастет прочность на растяжение (в 5–6 раз), вдвое возрастет ударная прочность при отрицательных температурах. В ряде случаев возможно применение стекловолокна (длина волокон 3–20 мм) и органического волокна (длина волокон 3–30 мм) в количестве 0,25–4 % [73].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что спектр методов и материалов, используемых для повышения качества органических вяжущих для дорожного строительства, достаточно широк. С точки зрения доступности, экономичности и эффективности наиболее перспективным является использование тонкодисперсных материалов. В свою очередь, использование золошлаковых отходов в качестве модификатора битума весьма перспективно, имеется зарубежный опыт применения золы-уноса в качестве наполнителя битума. Исследователями была предложена методика модификации и установлена целесообразность данного метода. Однако в рамках этих исследований не проводилось изучение влияния химического состава и морфологии сырья на характер взаимодействия золы-уноса с битумом и влияния состава и свойств золы различных типов на свойства вяжущего.

1.3. Представление о роли наполнителя битума в асфальтобетонах с учетом его природы, дисперсности и состояния поверхности

Целесообразность применения минеральных наполнителей для модификации битума была обозначена ещё в начале 1900-х годов и состоит в регулировании и улучшении свойств вяжущего.

Согласно традиционным представлениям минеральный наполнитель представляет собой неорганический продукт, который при смешении с битумом сохраняет свою первоначальную форму и размеры, не проявляет в этой смеси коллоидных свойств и не вступает с ним в реакцию. Большая часть типичных наполнителей проходит через сито с отверстиями 1,65 мм, но характер и размеры частиц наполнителей бывают различными в зависимости от того, для каких продуктов они применяются [104]. Как правило, минеральные наполнители делят на две группы – дисперсные и волокнистые, которые в свою очередь различают по происхождению и составу (рисунок 1.8).

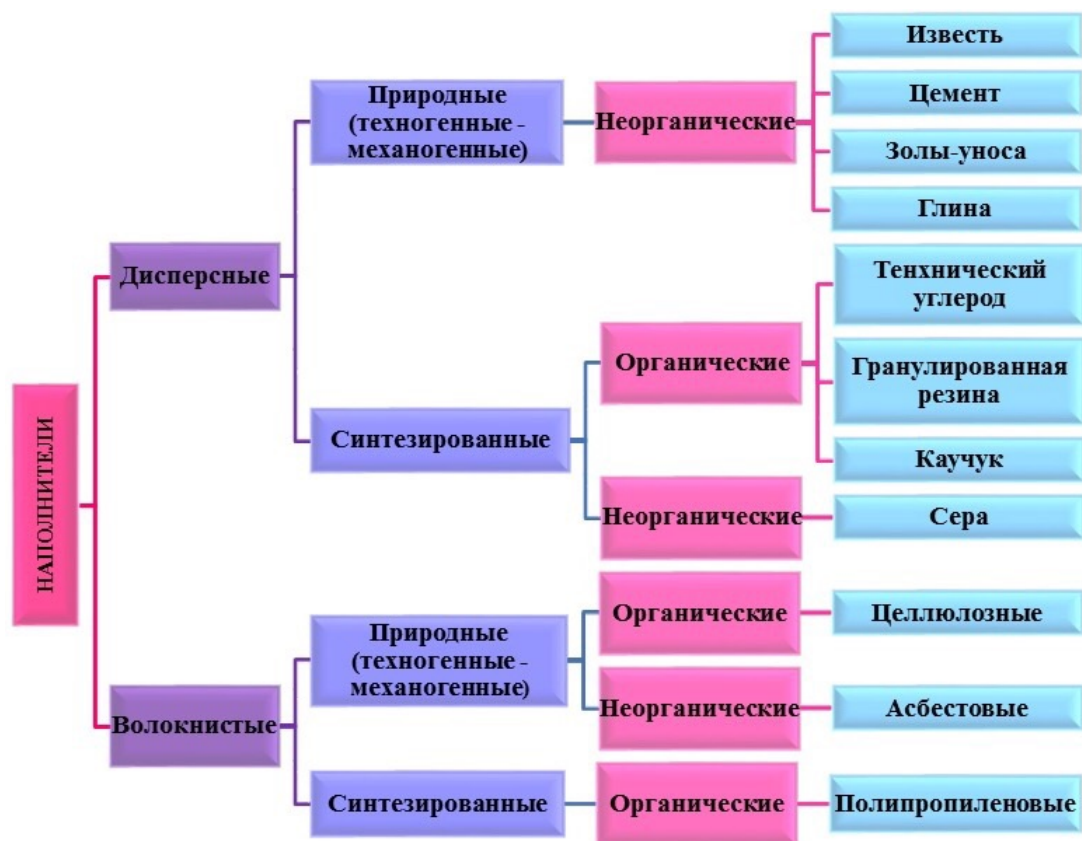


Рисунок 1.8 – Классификация минеральных наполнителей

Механизм действия наполнителей на свойства битумоминеральных композиций для дорожного строительства был рассмотрен многими учеными [105–114]. Сахаровым П.В. [115] впервые было изучено назначение минерального порошка как структурной составляющей, которая объединяясь с битумом образует «асфальтовяжущее вещество», склеивающая минеральные зерна. Придавая большое значение роли минерального порошка в дорожно-строительных композитах, он предложил называть его «асфальтирующей добавкой» к битуму. При этом в качестве минерального порошка было рекомендовано применять измельченные асфальтовые породы.

Установлено [116–118], что битумы при смешении с минеральными наполнителями претерпевают структурные изменения. При этом различают ориентированный слой битума и объемный битум (рисунок 1.9).

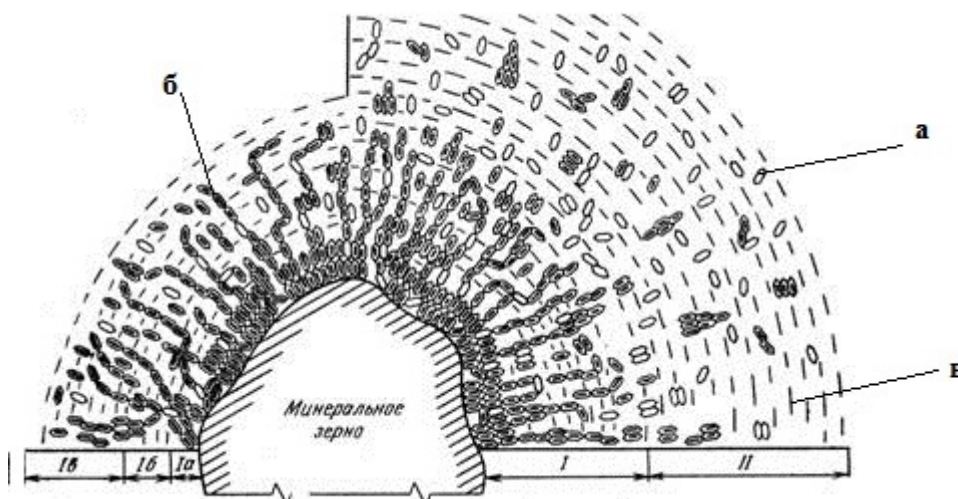


Рисунок 1.9 – Строение пленки битума на минеральной частице [104]:

I – ориентированный слой; II – объемный битум;

Ia – твердообразная зона; Ib – структурированная зона; Iv – диффузная зона;

а – ароматические углероды; б – асфальтены; в – парафино-нафтеновые кислоты

Ориентированный слой (I) формируется на первой стадии физического и химического взаимодействия в результате обволакивания частиц битумом. На этом этапе происходит физико-химическое взаимодействие битума с минеральным материалом, в следствии чего формируются адсорбционно-сольватные слои.

При этом в ориентированном слое битума выделяют твердообразную (Ia), структурированную (Iб) и диффузную (Iв) зоны. Твердообразная (Ia) граничит непосредственно с поверхностью частиц минерального наполнителя и представлена в основном адсорбционным слоем, а ее толщина не превышает долей микрометра.

Структурированная зона (Iб) состоит из высокомолекулярных компонентов битума, которые имеют упорядоченное расположение и ориентированы в направлении минеральной подложки. Диффузная зона, располагающаяся за структурированной, является переходной между ориентированным слоем и объемным битумом, имеющим частично упорядоченное строение. Стоит отметить, что между ориентированным слоем и объемным битумом не наблюдается резкого перехода, как и внутри слоя между зонами. При этом характер поверхности минерального наполнителя, на которой адсорбирован битум оказывает значительное влияние на свойства битума в тонких слоях [119].

Кроме того, при взаимодействии битума с разного рода минеральными наполнителями образуется первичная или вторичная коагуляционная структура, прочность которой в значительной степени обуславливается свойствами минерального наполнителя. Контакты в коагуляционных структурах осуществляются или через очень тонкие прослойки дисперсионной среды (битума) (рисунок 1.10, а) и точечные контакты (рисунок 1.10, в), или при участии макромолекул (рисунок 1.10, б).

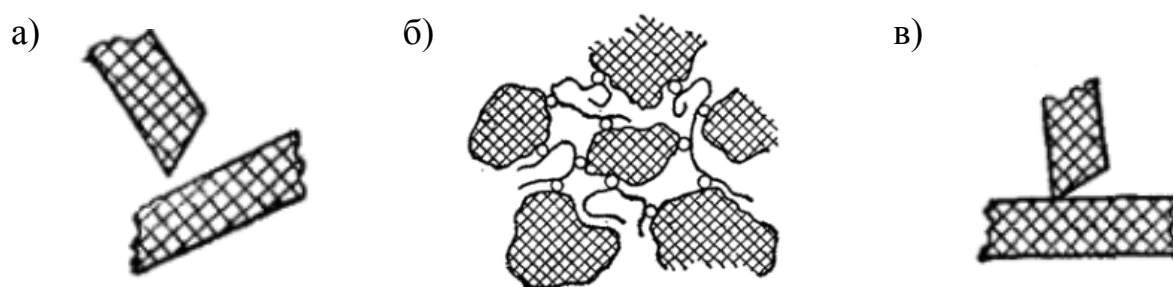


Рисунок 1.10 – Контакты в коагуляционных структурах

Последователи П.В. Сахарова [105, 107–109, 111–114, 120] установлено, что тонко измельченный материал действует в качестве модификатора битумного связующего.

Свойства наполнителя определяют реологические свойства битумов, и наиболее важными являются размер его частиц и распределение их по размерам (полидисперсность), а также форма и характер упаковки частиц [120]. В результате добавления минерального наполнителя увеличивается плотность получаемой массы, ее вязкость и, как следствие, возрастает устойчивость к напряжениям сдвига, возникающим при практическом использовании. Кроме того, наполнители служат частичной защитой от разрушающего действия солнечных лучей, вызывающих фотоокисление. В связи с этим наиболее эффективно применение непрозрачных наполнителей типа сланцевой пыли или диабаз, менее эффективны полупрозрачные наполнители типа кварца [104]. Волокнистые минеральные наполнители создают в битумной массе развитый минеральный скелет (т.е. структурируют битум), это способствует определенному возрастанию упругости и эластичности битумно-минеральной массы.

В настоящее время широкое применение в качестве наполнителей нашли представители техногенного сырья из отходов различных производств.

В последние годы в научно-технической литературе появляются данные о повышении эксплуатационных свойств битумных композиций путем применения технического углерода (ТУ) [120, 121–125], представляющего собой тонкодисперсный порошок черного или темно-серого цвета, получаемого при утилизации отработанных шин. [126–128]. Данный материал представляет собой агрегаты наночастиц и является активным наполнителем и антиоксидантом в композиционных материалах различного назначения. Согласно [129] порошкообразный ТУ имеет средний размер частиц – 35 нм, истинную плотность – $1,978 \text{ т/м}^3$, удельная адсорбционная поверхность $200 \text{ м}^2/\text{г}$, удельная внешняя поверхность – $175 \text{ м}^2/\text{г}$. Введение ТУ в битумы вызывает повышение вязкости битума, возрастание теплоустойчивости и трещиностойкости, улучшение адгезионных свойств, понижение показателей растяжимости и повышение устойчивости битума к старению при термоокислительных воздействиях. Повысить качественные показатели битума возможно при введении ТУ в количестве 3–5 масс. %. Битумные композиции оптимальной структуры с использованием технического углерода имеют достаточно

высокую прочность ($R_{20} = 6,87\text{--}7,45$ МПа), данный факт позволяет сделать вывод о существенной структурообразующей роли технического углерода как наполнителя дорожных композитов, которая в свою очередь объясняется высокой дисперсностью, адсорбционной способностью и химической активностью частиц.

Имеется положительный опыт использования механоактивированных органо-минеральных добавок в виде природных сорбентов – бурого угля и сапропеля [130]. Применение этих материалов в качестве добавки к вяжущему для дорожного строительства обусловлено высокой удельной поверхностью, развитой поровой структурой и высокими адсорбционными характеристиками. Однако, для усиления структурной активности органо-минеральных наполнителей требуются термообработка и механоактивация. Применение вяжущего с содержанием наполнителя 10 мас. % приводит к увеличению прочности асфальтобетона, в случае сапропеля – 1,3 раза, а бурого угля – 1,6 раза [131].

Скорлупа маньчжурских орехов (СМО) в составах битумо-минеральных композиций для дорожного строительства так же получила распространение [131–135]. На территории нашей страны большие массивы маньчжурского ореха расположены на юге Красноярского края. СМО образуется в результате переработки ореха в пищевых и медицинских целях и составляет 69–75 % от массы самого ореха. В составе СМО отмечается наличие активных функциональных групп, а также лингина (на 23,5 % состоящего из низкомолекулярных фрагментов ароматического характера и на 76,5 % из более высокомолекулярных полимерных образований ароматического характера) в количестве 54,3 % и целлюлозы – 35,4 %. Наличие активных функциональных групп способствует взаимодействию элементов системы «вяжущее-добавка». Как известно [136–138] добавки на основе целлюлозы являются стабилизаторами, гомогенизирующими горячие битумо-минеральные композиты для дорожного строительства. В свою очередь, лингинсодержащие добавки СМО позволяют понизить температуру хрупкости вяжущего и улучшить его качественные характеристики в целом, что позволяет положительно повлиять и на физико-механические характеристики асфальтобетона [139, 140].

Оптимальной концентрацией добавки СМО с размером частиц 500–700 мкм в органическом вяжущем колеблется в пределах от 4 до 6 %. При этом, отмечается заметное повышение температуры размягчения битума на 5–6 °С повышается устойчивость к старению и адгезионная способность вяжущего, что приводит к улучшению основных характеристик асфальтобетона – прочности на сжатие при 20 и 50 °С (косвенно свидетельствует о тепловой устойчивости асфальтобетона), коэффициентов водостойкости и длительной водостойкости [132].

Интерес для дорожно-строительной отрасли представляют и отходы очистки сточных вод – депонированные осадки сточных вод (ОСВ), представляющие органоминеральный комплекс, образующийся в результате биологической очистки жидкости с последующим осаждением взвеси. Состав осадков характеризуется относительным постоянством и, в минеральной части представлен преимущественно алюмосиликатами – монтмориллонитом, каолинитом, иллитом; карбонатами – кальцитом; кварцем, кремнеземом; в органической части – белково-, жиро-, углеводоподобными веществами (80–85 %) и лингино-гумусовым комплексом соединений (15–20 %). Присутствие добавки ОСВ в битумо-минеральных композициях оказывает положительное влияние на их физико-механические характеристики, в частности на прочность при 50 °С, набухание и коэффициент водостойкости.

Использование таких наполнителей как известняк, цемент и крупнозернистый песчаник также имеет место при получении битумо-минеральных композиций [141]. Значения удельной поверхности для известняка, цемента и песчаника составили 1,3; 1,4 и 6,0 м²/г соответственно. Использование этих наполнителей при различных концентрациях позволило повысить сопротивление битума сдвигу, о чем свидетельствуют и результаты испытания битума на жесткость.

В работах зарубежных научных ученых рассмотрена и возможность использования в качестве наполнителей таких материалов как зола-уноса, порошки углерода и железа [142]. Зола-уноса в сравнении с порошками углерода (сажа) и железа характеризуется наличием широкого спектра химических элементов (О, С, Fe, Cl, CaO, Na₂O, SiO₂, TiO₂, SO₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Al₂O₃), однако все исследуемые

образцы обладают высокой удельной поверхностью. При этом эффект значительное влияние модифицирующих материалов оказывает их концентрация, которая составила 14, 27, 36, 41 и 57 % для каждого из представленных наполнителей. Увеличение концентрации наполнителей приводит к увеличению температуры размягчения во всех трех случаях, что вполне закономерно, однако у сажи отмечена лучшая корреляция.

Учеными научной школы БГТУ им. В.Г. Шухова была рассмотрена возможность использования алюмосиликатных пород [143–145]. Исследуемые особенности минеральных наполнителей из алюмосиликатных горных пород заключаются в значительном содержании слоистых алюмосиликатов, которые приводят к снижению физико-механических характеристик битумоминеральных композиций (в частности прочность водонасыщенных образцов на 39–55 %), однако термическая обработка минеральных материалов и механоактивация приводит к получению композитов на их основе с повышенными физико-механическими характеристиками (водостойкость повышается в 1,5–2 раза, набухание снижается на в 3,9–8,8 раза, значительно повышается прочность образцов в водонасыщенном состоянии).

Таким образом, изучение роли наполнителя битума в асфальтобетонах на примере различных материалов показало, что происхождение минерального наполнителя, его состав, дисперсность, состояние поверхности и активность по отношению к битуму оказывают значительное влияние на характеристики получаемых битумоминеральных композиций. Использование различного рода наполнителей позволяет улучшить как характеристики битумов (сдвигоустойчивость, теплостойкость), так и положительно повлиять на технико-эксплуатационные характеристики асфальтобетонных на их основе. При этом в нашей стране имеется огромное количество техногенного сырья пригодного для вторичного использования в том числе и для модификации битума. В этой связи перспективными являются отходы топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса ТЭС.

1.4. Особенности получения золошлаковых отходов и опыт их применения в составе асфальтовых композиций

В настоящее время обострение проблем охраны окружающей среды заставляет акцентировать внимание на возможности вторичного использования техногенного сырья и вовлечения его в технологический процесс, а в связи с накоплением большого количества техногенных отходов промышленных комплексов и снижением уровня содержания целевых компонентов в исходном сырье остро встает вопрос их комплексного использования [146].

В их основу, как правило положены генетические особенности, т.е. условия образования, состав (минеральный, реже химический), дисперсность. Согласно классификации (рисунок 1.11.) отходы можно разделить на механогенные; пирогенные; хемогенные; биогенные. При этом наибольший интерес для стройиндустрии, ввиду состава и свойств представляют пирогенные и механогенные.

Среди техногенного сырья пирогенного происхождения одно из первых мест по объему образования занимают золы и шлаки от сжигания твердых видов топлива. Это связано с тем, что основным источником для выработки электроэнергии в нашей стране являются топливосодержащие ископаемые (антрацитовые, бурые и каменные угли, горючие сланцы, торф) [147].

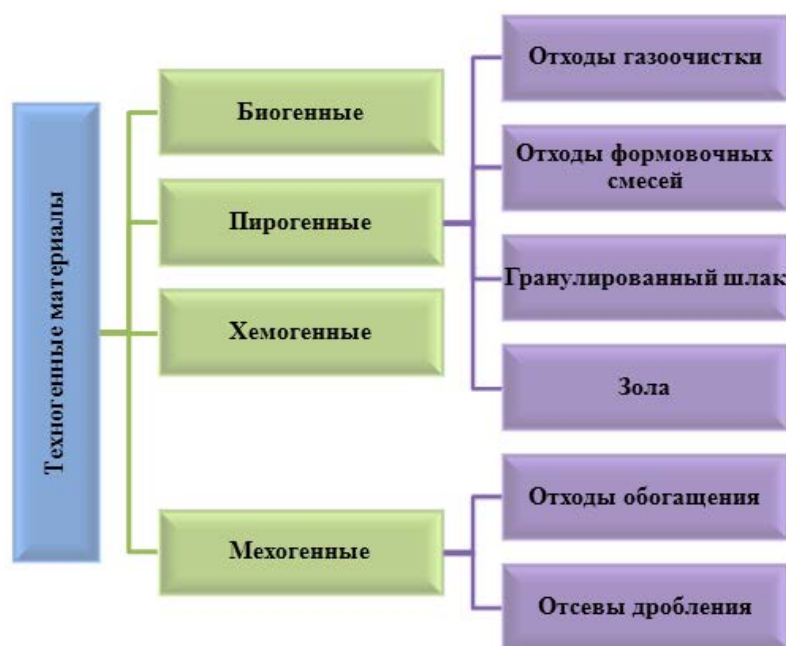


Рисунок 1.11 – Классификация техногенных материалов

На угольных теплоэлектростанциях в мире производится около 40 % общего объема электроэнергии, из них в США, Германии и некоторых других странах – около 70 %. Предполагается, что, по меньшей мере, до 2030 года в Китае, США и многих других странах рост производства электроэнергии будет происходить за счет ещё более определяющего развития угольной энергетики [148].

В Российской Федерации около 70 % всей электроэнергии вырабатывает от сжигания твердого топлива – углей, сланца, торфа. В результате образуется около 50 млн. т отвалов золошлаковых отходов. В нашей стране насчитывается около 200 действующих ТЭС (рисунок 1.12), на многих из них ежегодный выход золы и шлака превышает 1 млн. т, а на станциях, сжигающих многозольное топливо, – достигает 5 млн. т.



Рисунок 1.12 – Территориальное расположение тепловых электростанций России

За сутки работы ТЭС мощностью 1 млн кВт сжигает 10 000 т угля и выделяет 1 000 т шлака и золы. Ежегодно для такого захоронения шлаков (при его высо-

те 8 м) требуется более 1 га площадей [147].

Таким образом, отходы топливно-энергетического комплекса, образующиеся в топках тепловых электростанций, представляют собой огромные скопления золы в виде пылевидных остатков и кускового шлама, а также различные золошлаковые смеси [155]. Эти продукты высокотемпературной обработки (1200–1700 °С) минеральной части топлива нашли широкое применение во многих странах мира, и, учитывая мировую тенденцию к увеличению доли вторичного рынка использования отходов, следует прогнозировать повышение темпов их переработки и у нас в России.

Технологически переработка твердого топлива в тепловую энергию осуществляется либо на установках с колосниковыми решетками путем обжига кускового сырья (размером 3–150 мм), либо в топках пылевидного сжигания предварительно измельченного сырья во взвешенном состоянии. Кусковое топливо используют только на мелких предприятиях. В камерных топках тепловых электростанций образуются два вида отходов: зола-уноса и шлак [157].

Размер зерен **шлака** составляет 1–50 мм и он образуется в результате слипания размягченных частиц золы в объеме топки или на ее стенках, накапливаясь в шлаковом бункере под топкой.

Размер частиц **золы** менее 0,3 мм. Она удаляется из топки с дымовыми газами и улавливается при их очистке в циклонах и электрофильтрах. Улавливается зола золоуловителями. Существует золоулавливание сухое (например, ТЭС–3 и ТЭС–2 г. Владивостока) на электрофильтрах (зола-уноса) и мокрое (например, ТЭС–1 г. Хабаровска и Биробиджанской ТЭС) на скрубберах с трубами Вентури (зола гидроудаления) [149].

При сухом способе крупные частички улавливаются циклонами, мелкие – электрофильтрами, при этом определенная фракция золы улавливается на определенном поле электрофильтра [150].

В России около 85 % золошлаков ТЭС транспортируются системами гидрозолоудаления, и лишь около 15 % – системами пневмозолоудаления [151]. Однако в настоящее время намечена тенденция к переходу от «мокрого» к «сухому» спо-

собу получения зол-уноса, так как доказано, что первый не позволяет получать отходы требуемого качества и дальнейшее использование становится экономически и экологически нецелесообразно.

В зависимости от вида топлива зола подразделяется на несколько видов (рисунок 1.13). Содержание золы при сгорании топлива различно: в каменных и бурых углях – 1–45 %, в горючих сланцах – 50–80 %, в топливном торфе 2–30 %.



Рисунок 1.13 – Классификация зол в зависимости от вида топлива

В качестве важнейших физических свойств золошлаковых отходов стоит выделить: гранулометрический состав, насыпную и истинную плотность, водонасыщение, а также способность к морозному пучению, которые во многом определяются видом сжигаемого топлива, режимом сжигания, способом улавливания и методом отбора [152]. Данные показатели важны значение для оценки возможности вторичного использования техногенных отходов в промышленности.

Минеральный состав твердого топлива включает глинистые минералы, слюды, кварц, полевые шпаты, сульфиды железа, карбонаты кальция др. В зависимости от температуры сжигания возможно изменение минерального состава зол и шлаков в связи с взаимодействием компонентов минеральной части и образованием различных химических соединений. При этом глинистые минералы последовательно дегидратируются и аморфизуются, т.е. переходят из кристаллического состояния в аморфное. Зерна кварца, находящегося в топливе, при сжигании почти не изменяются. Происходит лишь их растрескивание и оплавление. Соедине-

ния железа в процессе сжигания топлива переходят в гематит или магнетит, а карбонаты кальция и магния диссоциируют с образованием CaO , MgO и т.д. [153].

Органическая часть исходного топлива в процессе сжигания теряет летучие компоненты и переходит в полукокс (неспекшиеся частицы) и кокс (спекшиеся частицы) с последующим окислением до CO и CO_2 .

В отличие от зол, шлаки, образуемые при более высоких температурах, практически не содержат несгоревшее топливо и характеризуются большей однородностью. Однако их химический состав полностью зависит от сжигаемого угля и может изменяться в широких пределах. Примерное содержание основных оксидов в золах различных ТЭС, %: SiO_2 – 25–66; Al_2O_3 – 7–34; Fe_2O_3 – 3–18; CaO – 2–40; MgO – 1–4; SO_3 – 0,2–2,0; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ – 0,1–4,5 [139].

Таким образом, состав, свойства и строение отходов от сжигания твердого топлива зависят от следующих факторов (рисунок 1.14):

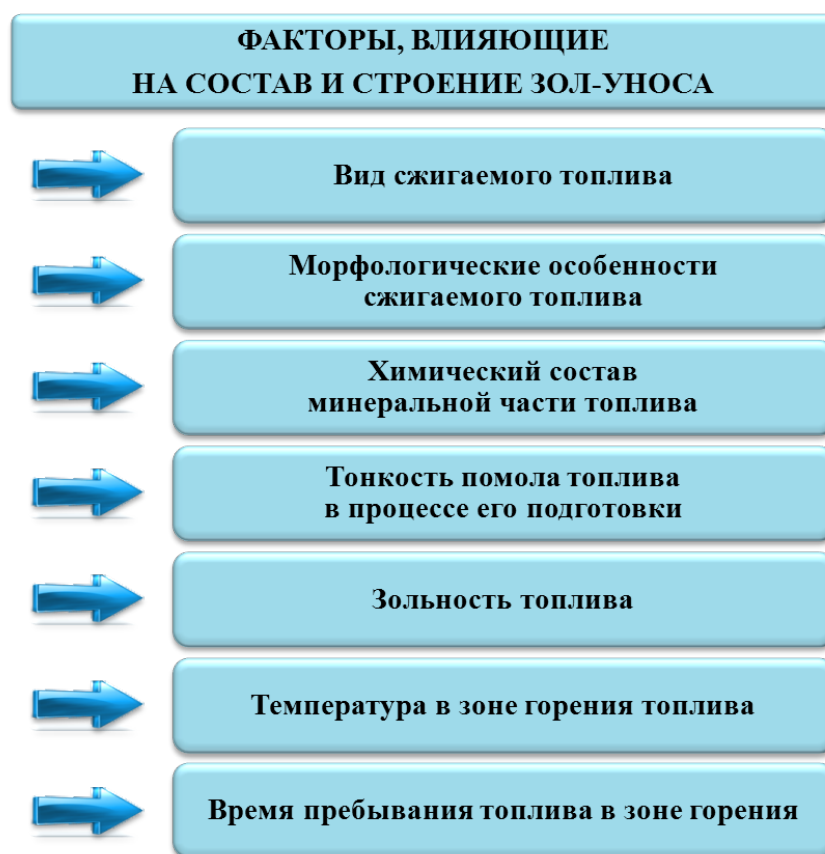


Рисунок 1.14 – Факторы, влияющие на состав и свойства зол-уноса

В нормативных документах и практических рекомендациях принято деление зол на два класса. Основным критерием служит способность в зависимости от состава проявлять в явной или скрытой форме гидравлические и пуццолановые свойства для оценки возможности использования золы в качестве активной минеральной добавки к цементу или бетону. При проявлении гидравлических свойств золу следует относить к основным, а при проявлении пуццолановых свойств – к кислым [153]. Часто деление зол на основные и кислые (высококальциевые и низкокальциевые) связывают с содержанием в их составе СаО, в том числе в свободном виде [155].

Кислые золы, как правило, представлены плотными или полыми сферическими частицами или агломератами таких частиц. Иногда на микрофотоснимке они могут выглядеть как полая сфера, наполненная более мелкими золами.

Основные золы обычно состоят из смеси сферических и бесформенных кристаллических частиц [148].

Проведенный анализ соотношения объема отходов, получаемых на ТЭС и потребляемый различными отраслями промышленности, показывает небольшой процент (5–10 %) их «полезной» утилизации в нашей стране. В 1998 г. было утилизировано менее 5 % образовавшихся золошлаковых отходов ТЭС (из 40 млн т утилизировано только 1,8 млн т).

Однако уровень утилизации золошлаковых отходов в ряде развитых стран составляет высокий процент от текущего выхода. Согласно статистическим данным этот показатель во Франции и Германии составляет 70 %, а в Финляндии – около 90 % их текущего выхода. В этих странах в основном применяются сухие золы и проводится государственная политика, стимулирующая их использование [156]. В Польше ТЭС доплачивают потребителям в связи с высокой стоимостью земли под золоотвалы, а в Китае золы доставляют покупателям бесплатно. В Болгарии стоимость золы нулевая, а в Великобритании существовали уже в 90-х гг. прошлого века [157].

Следовательно, в связи с тем, что количество получаемых отходов в Российской Федерации на порядок превышает количество утилизируемых (в 2005 го-

ду данный показатель составил 1,3–1,5 млрд. т [158]) необходимо увеличение потребления золошлаковых отходов в различных отраслях промышленности для улучшения экологической обстановки в нашей стране [159].

Золоотвалы создают большую экологическую напряженность и представляют большую экологическую угрозу как для окружающей среды, так и для здоровья людей. В результате ветровой эрозии частицы золы поступают в атмосферу и распространяются на несколько километров. Осевшая пыль, а вместе с ней химически активные токсичные вещества, загрязняют почву. Под действием кислотных остатков происходит миграция токсичных веществ из золоотвалов, приводящая к загрязнению почв и грунтовых вод [160].

Количество накопленных зол-уноса в разрезе всего объема золошлаковых отходов наиболее критично, о чем свидетельствуют статистические данные, отражающие, что в 2010 году объем отвалов данного типа отходов составил 800 млн т (в 2,5 раза меньше объема производимого цемента).

Таким образом, для утилизации золошлаковых отходов, занимающих огромные территории (около 200 тыс. га), осложняющих экологическую обстановку и являющихся источником загрязнений воздушного и водного бассейнов, необходимо разработка корректной, обоснованной и многопрофильной нормативной базы, отсутствие которой затормаживает процесс их широкого применения [155, 157, 158, 160].

В развитых странах Европы свойства золошлаков, являющиеся побочным продуктом производства ТЭС, доводят до свойств, соответствующих требованиям нормативных документов. Данное обстоятельство стимулирует дальнейшее применение зол в промышленности без дополнительных усилий и средств на их переработку.

Анализ литературных источников показал, что в России и мире в настоящее время проводят активные исследования по перспективам внедрения золошлаковых отходов в промышленность строительных материалов, самую крупнотоннажную по потреблению сырья и производству готовой продукции [161–167]. Причем это позволит решить две основные задачи: снизить экологический прессинг в ре-

гионах и провести замену традиционного сырья на экологически чистые, более дешевые и более высококачественные аналоги.

Традиционные и новые направления полезного применения золошлаков энергетики России весьма разнообразны (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Рациональные области использования золошлаковых отходов

Необходимо отметить, что, несмотря на то, что использование зол датируется началом 30-х годов XX века, большинство областей использования предполагает собой простейшие технологии, такие как отсыпка оснований дорог, дамб, не реализующие возможности вышеуказанных отходов должным образом [168]. Однако использование отходов в этих целях должно быть обосновано в ходе испытаний пригодности и безопасности, с учетом механических нагрузок и погодно-климатических факторов. Также следует оценить химическую небезопасность использования зол с точки зрения загрязнения грунтовых вод, путем вымывания из золы легкорастворимых веществ [159].

Расширение номенклатуры сырьевых материалов для дорожного строительства и повышение эффективности их использования остается важнейшей проблемой. Многолетние научные исследования и практика дорожного строительства

показали, что одним из путей решения является применение отходов промышленности в качестве непосредственно дорожно-строительного материала или сырья для его производства.

Известно, что для полезного использования промышленных отходов необходимы их обогащение и/или активация по принципу: промышленный отход → полезный продукт → материал, пригодный для дальнейшего использования [148].

Использование зольных отходов при производстве строительных материалов регулируется нормативными документами, которые устанавливают определенные показатели качества, такие как дисперсный состав, химический состав, насыпная плотность, наличие посторонних включений [169]. Поскольку золы, формируемые при сжигании углей различных месторождений, значительно различаются между собой, их использование в строительстве определяется гранулометрическим и химическим составом углей.

В мировой практике известны различные инновационные сферы применения зольных отходов, показывающие прекрасные результаты в различных отраслях промышленности, например, производство пористой искусственной древесины (ПИД) [170–172], относящейся к строительным материалам нового поколения и по большинству своих технических и экономических показателей превышающая известные типы искусственной и натуральной древесины. Также производство пеноблоков [173], в составе которых замещение песка золошлаковой смесью позволяет улучшить прочность на сжатие и морозостойкость блоков, а также уменьшить их вес. Необходимо отметить заметные результаты и улучшение показателей разработок в таких областях как производство кирпича из золошлаков и производство ячеистых бетонов автоклавного твердения [174].

Особый интерес в применении золошлаковых отходов представляет дорожное строительство. Данная область промышленности является крупнотоннажным потребителем зол. Золы и золошлаковые смеси используют для устройства подстилающих и нижних слоев оснований [175–177], полной и частичной замены вяжущих при стабилизации грунтов цементом и известью, как минеральный поро-

шок в асфальтовых бетонах и растворах, как добавки в дорожных цементных бетонах [178–183].

Применение золошлаковых отходов в асфальтовых материалах является перспективной, актуальной и экономически целесообразной разработкой. В практике дорожного строительства известно проведение ряда исследований по изучению возможности применения золошлаковых отходов в качестве минерального порошка в составе асфальтобетонной смеси [184–186].

Свойства отходов ТЭС, определяющие их использование в качестве минерального порошка, зависят, прежде всего, от химико-минералогического состава, дисперсности, пористости, формы и текстуры поверхности частиц. Основное назначение золы в составе асфальтобетона состоит в повышении адгезионных свойств битума и заполнении порового пространства, образованного щебеночно-песчаным каркасом.

В работах зарубежных ученых [101] установлена возможность применения зол-уноса в качестве наполнителя органических битумных вяжущих в составе асфальтобетонной смеси для укладки слоев покрытия автомобильных дорог. Доказано, что введение золы позволяет улучшить стабильность битума в составе смеси, прочностные характеристики, водостойкость и сдвигоустойчивость асфальтобетонных смесей, что в свою очередь позволяет говорить о повышении стойкости к остаточным деформациям и снижении колебрования покрытия в процессе эксплуатации.

Однако для получения представительной выборки с целью повышения степени достоверности необходимо проведение дополнительных исследований для оценки возможности применения зол различных классов и генетических типов в качестве наполнителя асфальтобетонной смеси. Для этого необходимо изучить влияние золы-уноса на свойства конечного продукта – асфальтобетона и оценить значимость состава и отдельных свойств золы на улучшение показателей асфальтобетонного покрытия.

1.5. Выводы

1. Одной из основных проблем, возникающих при приготовлении асфальтобетонной смеси, выступает отсутствие запасов кондиционного сырья на территории нашей страны, а, следовательно, возможное удорожание стоимости смеси за счет транспортных расходов при калькулировании стоимости её составных компонентов. Решением данной проблемы является использование некондиционных природных материалов различного строения и генезиса, а также отходов промышленности, предполагая возможность частичной или полной замены традиционных составляющих асфальтобетонной смеси, применение, как основных, так и кислых пород в качестве сырья для производства асфальтобетона.

2. Другим путем решения данной проблемы является модифицирование вяжущего, которое возможно осуществить несколькими путями. Первый предполагает внесение изменений в процесс перегонки нефти, однако в связи с тем, что это требует кардинального переоснащения заводов он не нашел широкого применения. Второй путь предполагает модификацию вяжущего посредством введения разного рода наполнителей, из которых широкое применение получили органические добавки, показывающие отличные результаты. Однако для достижения поставленной цели возможно введение неорганических компонентов в качестве модификаторов, что позволит расширить сырьевую базу дорожных асфальтобетонов и корректировать свойства вяжущего в зависимости от типа добавки. Данный способ имеет преимущество в связи с простотой осуществления, однако необходимо четкое понимание процессов, происходящих при введении добавок в битум для возможности корректировки состава и свойств конечного продукта и влияния на желаемые результаты.

3. Спектр методов и материалов, используемых для повышения качества органических вяжущих для дорожного строительства, достаточно широк. С точки зрения доступности, экономичности и эффективности наиболее перспективным является использование тонкодисперсных материалов. В свою очередь, использование золошлаковых отходов в качестве модификатора битума весьма перспек-

тивно, имеется зарубежный опыт применения золы-уноса в качестве наполнителя битума. Исследователями была предложена методика модификации и установлена целесообразность данного метода. Однако в рамках этих исследований не проводилось изучение влияния химического состава и морфологии сырья на характер взаимодействия золы-уноса с битумом и влияния состава и свойств золы различных типов на свойства вяжущего.

4. Происхождение минерального наполнителя, его состав, дисперсность, состояние поверхности и активность по отношению к битуму оказывают значительное влияние на характеристики получаемых битумо-минеральных композиций. Использование различного рода наполнителей позволяет улучшить как характеристики битумов (сдвигоустойчивость, теплостойкость), так и положительно повлиять на технико-эксплуатационные характеристики асфальтобетонов на их основе. При этом в нашей стране имеется огромное количество техногенного сырья пригодного для вторичного использования в том числе и для модификации битума. В этой связи перспективными являются отходы топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса ТЭС.

5. Для получения представительной выборки с целью повышения степени достоверности необходимо проведение дополнительных исследований для оценки возможности применения зол различных классов и генетических типов в качестве наполнителя асфальтобетонной смеси. Для этого необходимо изучить влияние золы-уноса на свойства конечного продукта – асфальтобетона и оценить значимость состава и отдельных свойств золы на улучшение показателей асфальтобетонного покрытия.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Методы исследований

Изучение сырьевых материалов и композитов на их основе проводились в следующих лабораториях БГТУ им. В.Г. Шухова:

- Центра высоких технологий;
- Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ);
- кафедры «Материаловедение и технология материалов»;
- кафедры «Автомобильные и железные дороги»;
- кафедры «Неорганическая химия».

2.1.1. Оценка физико-механических характеристик сырьевых компонентов, модифицированного вяжущего и асфальтобетонов на его основе

Определение удельной поверхности зол-уноса. Значение удельной поверхности является одним из важнейших параметров порошкообразных материалов. Измерение удельной поверхности ($S_{уд}$, см²/г) осуществляли на приборе ПСХ-12(SP)¹ (таблица 2.1), который так же позволяет определять средний размер частиц (d , мкм). Принцип действия прибора основан на зависимости воздухопроницаемости слоя порошка от величины его удельной поверхности.

Специфика прибора состоит в том, что значения удельной поверхности вносятся в протокол в единицах измерения – см²/г. В связи с этим, для удобства обработки полученных данных результаты измерений требуют перевода в систему СИ – м²/кг.

¹ В учебно-научной лаборатории «Дисперсионного анализа» на кафедре «Материаловедение и технология материалов»

Таблица 2.1 – Технические характеристики ПСХ-12(SP)

Характеристики прибора	Значения
Диапазон измерений удельной поверхности, $\text{см}^2/\text{г}$	200–50000
Диапазон измерений среднемассового размера частиц, $\mu\text{м}$	0,5–200
Аппаратурная погрешность не более, %	± 3

Определение активной удельной поверхности зол-уноса осуществляли на приборе СОРБИ-М² (таблица 2.2) по 4-х точечному методу БЭТ. Принцип действия прибора основывается на сравнении объемов газа-адсорбата, сорбируемого исследуемым образцом и стандартным образцом материала с известной удельной поверхностью. В качестве газа-адсорбата был использован азот.

Таблица 2.2 – Технические характеристики СОРБИ-М

Характеристики прибора	Значения
Диапазон измерений удельной поверхности	0,01–2000 $\text{м}^2/\text{г}$
Предел допускаемой относительной погрешности измерений удельной поверхности	$\pm 6 \%$
Температура окружающей среды	5–40 $^{\circ}\text{C}$
Рабочий объем ампулы	1 см^3
Относительная влажность воздуха, не более	75 %

Как и в случае с прибором ПСХ-12(SP), результаты измерений на приборе СОРБИ-М требуют перевода из $\text{м}^2/\text{г}$ в $\text{м}^2/\text{кг}$ (система СИ).

Гранулометрический состав и дисперсность зол-уноса определяли методом лазерной гранулометрии с помощью прибора ANALYSETTE 22 NanoTec plus³ с диапазоном измерений 0,01–2000 $\mu\text{м}$. Принцип действия основан на регистрации оптического излучения, рассеянного частицами в проточной кювете анализатора. В качестве источников света используются два лазерных источника с длинами

² В учебно-научной лаборатории «Дисперсионного анализа» на кафедре «Материаловедение и технология материалов»

³ В лаборатории «Высоких технологий» Центра высоких технологий

волн 532 и 940 нм. Рассеянное лазерное излучение под разными углами регистрируется с помощью высокочувствительного многоэлементного детектора – фотодиодной матрицы. По измеренной зависимости интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния осуществляется расчет распределения частиц по размерам.

Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов техногенного сырья осуществляли в соответствии с ГОСТ 30108–94, СанПиН 2.6.1.2523–09 и НРБ–99/2009 [187, 188] с помощью гамма-бета-спектрометрического комплекса «Прогресс БГ»⁴. В состав комплекса входят: детектирующая система GEM–40190–S на базе полупроводника из высокочистого германия; спектрометрический усилитель и многоканальный анализатор импульсов 92X «Spectrum Master»; система визуализации и обработки спектра.

Определение истинной плотности, средней плотности, пористости, показателя битумоемкости и влажности зол-уноса как наполнителей битума осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003 [46].

Определение физико-механических характеристик битума проводили согласно ГОСТ 11501–78 [189], ГОСТ 11505–75 [190], ГОСТ 11506–73 [191], ГОСТ 11507–78 [192].

Реологические характеристики битума с использованием вибрационного ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1⁵ (таблица 2.3) и измерительной системы пластина/пластина. Для проведения измерений применялась пластина Р1 диаметром 36 мм с диапазоном измерения вязкости 100–10⁸ мПа×с.

Определение физико-механических характеристик крупного и мелкого заполнителей для асфальтобетонной смеси проводили по стандартным методам согласно ГОСТ 8269.0–97 [23], ГОСТ 8735–88 [193].

⁴ В центре «Радиационного мониторинга» кафедры «Неорганической химии», аккредитованном в Госстандарте РФ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Комплекс гамма-бета-спектрометрический «Прогресс БГ», завод. № 0693-Г. Проверен в ФГУ «Менделеевский ЦСМ». Свидетельство № 42010.2М371

⁵ В научно-исследовательской лаборатории «Синтеза и исследований наносистем, ИК-спектроскопии» на кафедре «Материаловедение и технология материалов»

Методика лабораторных исследований асфальтобетонов предусматривала проведение ряда испытаний в соответствии с ГОСТ 12801–2013 [24] на образцах, полученных уплотнением смесей в формовочной машине, с последующим сопоставлением полученных результатов с нормативными требованиями.

Таблица 2.3 – Технические характеристики ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1

Характеристики оборудования	Значения
Момент вращения	от 0,1 до 150 мНм
Разрешение по моменту вращения	0,002 мНм
Число оборотов	от 0 до 1000 об/мин
Разрешение по числу оборотов	0,015 об/мин
Диапазон угла поворота	–50...300°
Разрешение по углу поворота	0,001°
Диапазон температур	–30...+200°C
Частота	0,001–10 Гц

Устойчивость асфальтобетона к колееобразованию определяли с помощью аппарата для испытания колесной нагрузкой InfraTest Prütechnik GmbH⁶ (Германия) в соответствии с европейским стандартом EN 12697-22. Данный прибор позволяет моделировать условия эксплуатации асфальтобетона под действием нагрузки от движущегося транспорта (колесная нагрузка).

2.1.2. Оценка состава, физико-химических свойств и структурных особенностей сырьевых и синтезированных материалов

Рентгенофазовый анализ позволяет провести качественную и количественную оценку фазового состава зол-уноса. Рентгенограммы получены при помощи дифрактометра семейства ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific⁷) с использовани-

⁶ В научно-исследовательской лаборатории кафедры «Автомобильные и железные дороги»

⁷ В лаборатории «Рентгеноспектральных исследований» Центра высоких технологий

ем излучения Со-анодов, шагом сканирования $0,03^\circ$ и временем измерения интенсивности в точке сканирования – 1 с.

Для *качественной* оценки фазового состава расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием справочной литературы [194, 195] и базы данных PDF-2 Международного центра дифракционных данных (ICDD⁸).

Количественную оценку фазового состава (в масс. %) проводили с применением полнопрофильного количественного РФА. Расчеты проводились с использованием программного обеспечения DDM v.1.95e в варианте алгоритма «Derivative Difference Minimization», позволяющего не уточнять аппроксимационные параметры фона дифракционного спектра со сложной структурой [196]. В качестве структурных моделей минеральных компонентов использовались данные ICSD⁹.

Инфракрасная спектроскопия проводилась с помощью прибора Vertex 70¹⁰ фирмы Bruker Optics в среднем инфракрасном диапазоне от 370 см^{-1} до 4000 см^{-1} . Прибор оснащен программным обеспечением OPUS. Образцы готовились в виде таблеток с KBr, съемка проводилась в режиме поглощения.

Обработка результатов исследования проводилась *по методу Фурье-деконволюции*¹¹ [197–200]. Целью этого метода является разложение сложных спектров на составляющие, параметры которых (положение, интенсивность, ширина и вид контура) оптимизируются, обеспечивая минимальное различие между экспериментальной и рассчитанной спектральной кривой. Преобразование спектральных кривых проводилось с использованием программного обеспечения PeakFit [201].

Микроструктурный анализ образцов зол-уноса проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Mira 3 LMU¹² (Tescan, Чехия) со специальным InBeam детектором и катодом Шоттки высокой

⁸ The International Centre for Diffraction Data

⁹ ICSD – Inorganic Crystal Structure Database

¹⁰ В научно-исследовательской лаборатории «Синтеза и исследований наносистем, ИК-спектроскопии» на кафедре «Материаловедение и технология материалов»

¹¹ Термин «деконволюция» происходит от англ. convolution – «свертка», поэтому «деконволюция» – операция, обратная свертке

¹² В лаборатории «Синтеза и исследований нано- и микроструктур» Центра высоких технологий

яркости для получения изображений высокого разрешения, высокой контрастности, с низким уровнем шумов.

Кисотно-основные характеристики поверхности используемых зол-уноса оценивали по характеру распределения кислотных и основных центров адсорбции льюисовского и бренстедовского типов на их поверхности. Данная методика основана на адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердых частиц в водной среде [202], это приводит к изменению окраски индикаторов, которая в свою очередь позволяет определить величину кислотности (основности) поверхности.

В работе использовались растворы цветных индикаторов, которые позволяют регистрировать кислотно-основные центры в диапазоне кислотности от $-4,4$ до $+12,8$ (таблица 2.4).

Оптическую плотность растворов для количественного определения центров адсорбции измеряли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовых и видимых областях спектра с помощью спектрофотометра LEKI SS1207¹³ (таблица 2.5). Измерения проводились в стеклянных кюветах относительно растворителя – дистиллированной воды.

Для проведения испытаний готовилось 3 серии растворов:

1) *Рабочий раствор*. В пробирку емкостью 5 мл заливали 2 мл индикатора с определенным значением pK_a^X , далее разбавляли до метки дистиллированной водой, перемешивали 30 минут, после чего всыпали навески образца ($a_1 \approx 0,02$ г). После установления адсорбционного равновесия (1 час) измеряли при длине волны $\lambda_{\max}$, соответствующей каждому индикатору, значение оптической плотности D_1 . В этом опыте учитывается взаимодействие образца с растворителем и процесс адсорбции.

2) *«Холостой опыт»*. Навеску образца ($a_2 \approx a_1$) помещали в сухую пробирку емкостью 5 мл и заливали 3 мл воды. Через час раствор декантировали в другую пробирку, добавляли нужное количество индикатора, доводили до метки водой,

¹³ В научно-исследовательской лаборатории «Синтеза и исследований наносистем, ИК-спектроскопии» на кафедре «Материаловедение и технология материалов»

выдерживали в течение 30 минут и измеряли значение оптической плотности (D_2), учитывающее $\pm \Delta D_2$ за счет изменения pH среды и растворения образца. В этом опыте исключается процесс сорбции индикатора.

3) *Раствор индикатора.* В пробирки емкостью 5 мл заливали нужные объемы индикаторов, разбавляли до метки водой, перемешивали и через 30 минут измеряли значение оптической плотности.

Таблица 2.4 – Кислотно-основные индикаторы, используемые в работе

№ п/п	Индикатор	pKa	$\lambda_{\max}$, нм	Переход окраски
1.	2,4-динитроанилин	–4,40	340	б.ц. – желт.
2.	Метанитроанилин	–4,40	340	б.ц. – желт.
3.	О-Нитроанилин	–0,29	410	б.ц. – желт.
4.	Кристаллический фиолетовый	+0,80	580	б.ц. – фиол.
5.	Бриллиантовый зеленый	+1,30	610	б.ц. – зел.
6.	Фуксин (основание)	+2,10	540	б.ц. – малин.
7.	Метиловый оранжевый	+3,46	460	желт. – оранжев.
8.	Метиловый красный	+5,00	430	желт. – крас.
9.	Бромкрезоловый пурпурный	+6,40	540	желт. – пурп.
10.	<i>n</i> -нитрофенол	+7,15	360	б.ц. – желт.
11.	Бромтимоловый синий	+7,30	430	желт. – син.
12.	Тимоловый синий	+8,80	430	желт. – син.
13.	Нильский голубой А	+10,50	640	роз. – гол.
14.	Тропеолин	+12,00	440	б.ц. – желт.
15.	Индигокармин	+12,80	610	б.ц. – син.

Содержание активных центров данной кислотной силы, эквивалентное количеству адсорбированного индикатора, рассчитывали по формуле:

$$q_{pKa^x} = \frac{C_{ind} \cdot V_{ind}}{D_0} \left(\left| \frac{D_0 - D_1}{a_1} \right| \pm \left| \frac{D_0 - D_2}{a_2} \right| \right), \quad (2.1)$$

где C_{ind} – концентрация раствора индикатора, мг-моль/мл; V_{ind} – объем раствора индикатора, взятого для анализа, мл; D_1 – оптическая плотность раствора индикатора до сорбции; D_2 – оптическая плотность раствора индикатора после сорбции;

D_0 – оптическая плотность «холостого» раствора. Знак “–” соответствует однонаправленному изменению D_1 и D_2 относительно D_0 , т.е. D_1 и $D_2 < D_0$ или D_1 и $D_2 > D_0$. Знак “+” соответствует разнонаправленному изменению D_1 и D_2 относительно D_0 , т.е. $D_1 > D_0$, $D_2 < D_0$ или $D_1 < D_0$ и $D_2 > D_0$.

Таблица 2.5 – Технические характеристики спектрофотометра LEKI SS1207

Характеристики оборудования	Значения
Спектральный диапазон, нм	340–1000 (± 2)
Спектральная ширина щели не более, нм	6,0
Кюветы (длина пути, мм)	10, 20, 30, 50
Материал кюветы	стекло
Диапазон измерения оптической плотности, Б	0–3,0

На основании полученных данных строилась кривая распределения кислотно-основных центров на поверхности минеральных порошков в координатах $q_{pKa}^X = f(pKa^X)$.

2.2. Характеристика применяемых материалов

2.2.1. Компоненты модифицированного органического вяжущего

В качестве вяжущего использовался битум нефтяной дорожный Московского НПЗ марки БНД 60/90, который соответствовал требованиям ГОСТ 22245–90 [43] и характеризовался следующими свойствами (таблица 2.6).

В качестве добавок для модификации битума были использованы отходы топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса. Для представительной выборки в рамках диссертационной работы было изучено 6 образцов зол-уноса. Критериями выбора сырьевых компонентов явился комплекс факторов, оказывающих значительное влияние на состав и свойства зол-уноса:

- вид исходного топлива;
- способы и режимы сжигания топлива («мокрый» или «сухой»);
- способ золоудаления («мокрый» или «сухой»);

- содержание СаО в составе зол-уноса (низкокальциевые – <10 % СаО, высококальциевые – >10 % СаО);
- производитель золы-уноса (отечественный зарубежный).

Таблица 2.6 – Физико-механические свойства применяемого битума

Показатели	Требования ГОСТ	Фактические значения
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	61–90	75
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм, не менее	20	22
Растяжимость при 25 °С, см, не менее	55	более 100
Растяжимость при 0 °С, см, не менее	3,5	4,1
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	47	49
Температура хрупкости, °С, не выше	–15	–17
Температура вспышки, °С, не ниже	230	238
Изменение температуры размягчения после прогре- ва, °С, не более	5	3
Индекс пенетрации	–1,0...+1,0	–0,4

Таким образом, предметом исследований в данной работе явилось техно-
генное сырье в виде зол-уноса, представленных в таблице 2.7.

2.2.2. Свойства компонентов минеральной части асфальтобетона

В качестве наполнителя для приготовления асфальтобетонных смесей на основе модифицированного вяжущего разными видами зол был использован традиционно применяемый в дорожном строительстве минеральный порошок, полученный из известняка, производства ООО «Стромис». Физико-механические характеристики применяемого минерального порошка соответствовали требованиям ГОСТ Р 52129–2003 [46] (таблица 2.8).

Таблица 2.7 – Характеристика применяемого техногенного сырья

Производитель ЗУ	Троицкая ГРЭС	Рефтинская ГРЭС	Новотроицкая ТЭЦ	WE Energies (WEE)	Columbia Energy Center (CEC)	Назаровская ТЭС
№ п/п	1	2	3	4	5	6
Страна производитель	Россия	Россия	Россия	США	США	Россия
Содержание СаО, масс. %	0,61	1,28	1,35	3,36	26,63	37,80
Вид применяемого топлива	Экибастузский каменный уголь	Экибастузский каменный уголь	Экибастузский каменный уголь	Каменный уголь	Бурый уголь	Бурый уголь
Зольность применяемого топлива, %	≈40	≈40	≈40	≈40	6–12	6–12
Способ сжигания топлива	«Сухой»	«Сухой»	«Мокрый»	«Сухой»	«Сухой»	«Сухой»
Способ удаления образовавшихся зольных отходов	«Сухой»	«Сухой»	«Мокрый»	«Сухой»	«Сухой»	«Сухой»
Ежегодное образование зольных отходов, млн. т	2	6	0,4	3	2	1

Таблица 2.8 – Физико-механические характеристики минерального порошка

Наименование характеристики	Требования ГОСТ	Фактические значения
Зерновой состав, % по массе:		
мельче 1,25 мм	не менее 100	100
<0,315	не менее 90	94
<0,071	от 70 до 80	83
Пористость, %, не более	35	27
Набухание образцов АВВ, %, не более	2,5	1,2
Водостойкость АВВ, %	не норм.	0,89
Показатель битумоёмкости, г	не норм.	66
Влажность, % по массе, не более	1,0	0,45

Таблица 2.9 – Физико-механические характеристики гранитного щебня

Наименование характеристики	Требования ГОСТ	Фактические значения
Полные остатки на ситах, % по массе:		
d	от 90 до 100	98,0
0,5(d+D)	от 30 до 60	60,0
D	до 10	3,3
1,5 D	до 0,5	0,0
Содержание зерен лещадной формы, % по массе	от 15 до 25	12,5
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	не более 1	0,60
Содержание глины в комках, % по массе	не более 0,25	–
Марка щебня по дробимости	от 600 до 1400	1400
Морозостойкость	от F15 до F400	F300
Насыпная плотность, кг/м ³	не норм.	1390

В качестве крупного заполнителя был использован гранитный щебень производства ОАО «Павловскгранит», соответствующий требованиям ГОСТ 8269.0–97 [23] (таблица 2.9).

В качестве мелкого заполнителя применяли отсев дробления гранитов производства ОАО «Павловскгранит», характеристики которого соответствовали требованиям ГОСТ 8736–93 [203] (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Физико-механические характеристики гранитного отсева дробления

Наименование характеристики	Требования ГОСТ	Фактические значения
Модуль крупности	от 2,5 до 3,0	2,9
Полный остаток на сите №063, % по массе	от 45 до 65	60,8
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	не более 10	0,48
Содержание глины в комках, % по массе	не более 2,0	–
Масса исходного щебня по прочности	от 600 до 1400	1400
Морозостойкость исходного щебня	от F15 до F400	F300

2.3. Выводы

1. При получении золобитумного вяжущего с использованием зол-уноса различного состава осуществлялся контроль сырьевых материалов, исследование системы «битум – зола-уноса» и асфальтобетонов на основе полученных вяжущих с применением современных методов исследования и оборудования: электронно-микроскопический анализ; рентгенофазовый анализ; гранулометрический анализ с расчетом удельной поверхности материалов; метод БЭТ для определения удельной поверхности с учетом пор открытого и закрытого характера в общей пористости материалов; анализ состояния поверхности техногенного сырья индикаторным методом; анализ удельной эффективной активности естественных радионуклидов; анализ реотехнологических характеристик. Определение основных физико-механических характеристик осуществлялось стандартными методами в соответствии с нормативными документами.

2. Исследования проводились с помощью современного оборудования, прошедшего аттестацию и другие надлежащие проверки, использовались стандартные и признанные методики, позволяющие получать достоверные и обоснованные результаты.

3. Для изучения возможности получения модифицированных вяжущих и асфальтобетонов на их основе в качестве сырьевых компонентов использовались битум нефтяной дорожный Московского НПЗ марки БНД 60/90 и техногенное сырье в виде зол-уноса полученных от сжигания твердого топлива следующими предприятиями: Рефтинская ГРЭС (РФ), Новотроицкая ТЭС (РФ), Троицкая ГРЭС (РФ), Назаровская ТЭС (РФ), а также золы-уноса предприятий США: WE Energies и Columbia Energy Center.

3. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛ-УНОСА ТЭС В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЯ, МОДИФИЦИРУЮЩЕГО БИТУМ

3.1. Физико-механические характеристики техногенного сырья

Для изучения возможности использования техногенного сырья в качестве модифицирующей добавки к битуму, используемому при производстве асфальтобетона, были изучены отходы топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса тепловых электростанций. В качестве объектов исследований выступали золы-уноса (ЗУ) отечественных – Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ), Назаровской ТЭС (РФ) и зарубежных производителей – WE Energies (WEE) и Columbia Energy Center (CEC) (США). Для сравнения качества исследуемых отходов топливно-энергетической промышленности использовался известняковый минеральный порошок производства ООО «Стромис».

При использовании зол-уноса довольно часто возникает вопрос об их радиоактивности. В связи с этим на первоначальном этапе исследований отходы топливно-энергетической промышленности были изучены на предмет их безопасности. Содержание естественных радионуклидов в исследуемых образцах зол-уноса определяли в соответствии с ГОСТ 30108–94 и Нормами радиационной безопасности (НРБ–99/2009) [188] в центре «Радиационного мониторинга» кафедры «Неорганической химии» БГТУ им. В.Г. Шухова. Согласно полученным данным (таблица 3.1), представленные материалы относятся к I классу и могут применяться во всех видах строительства.

Физико-механические характеристики зол-уноса определяли в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52129–2003 [46]. Данный документ выбран в качестве нормирующего физико-механические характеристики зол-уноса как минеральных порошков, так как процессы структурообразования минеральных модифицирующих наполнителей с битумом схожи по своему характеру с механизмом взаимодействия в бинарной системе «битум – минеральный порошок».

Таблица 3.1 – Содержание естественных радионуклидов в исследуемых золах-уноса

№ п/п	Производитель ЗУ	Содержание СаО, %	Содержание естественных радионуклидов, Бк/кг
1	Троицкая ГРЭС (РФ)	0,61	92,2874±26,1173
2	Рефтинская ГРЭС (РФ)	1,28	103,2373±24,3896
3	Новотроицкая ТЭС (РФ)	1,35	109,6729±34,8911
4	WE Energies (США)	3,36	227,563±40,285
5	Columbia Energy Center (США)	26,63	251,427±40,835
6	Назаровская ТЭС (РФ)	37,80	365,7630±54,4277
7	Известняковый МП	51,42	24,249±11,404
8	Допустимые значения согласно ГОСТ 30108–94	–	<370

Анализируя полученные данные (таблица 3.2), можно сказать, что все представители отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса по ряду физико-механических характеристик отличаются как между собой, так и в сравнении с традиционным тонкодисперсным наполнителем, применяемым в качестве минерального порошка – известняком.

Наиболее важными из приведенных в таблице 3.2 характеристик являются распределение частиц по размерам, удельная поверхность, пористость и битумоёмкость применяемого техногенного сырья из отходов топливно-энергетической промышленности.

Анализ распределения частиц по размерам проводился по стандартной методике – ситовым методом, позволяющим оценить количество частиц < 1,25; 0,315 и 0,071 мм. По полученным данным (таблица 3.2) можно говорить о том, что наибольшее количество частиц менее 0,071 мм содержится в высококальциевых золах-уноса – Назаровской ТЭС (РФ) и Columbia Energy Center (США) – 94,5 и 95,3 % соответственно.

Наряду с высококальциевыми золами, высоким содержанием частиц, прошедших через сито № 0,071 отличается низкокальциевая зола-уноса зарубежного производства – WE Energies (США) – 92,9 %. В сравнении с минеральным порош-

ком указанные золы имеют в своем составе большее количество частиц размером $< 0,071$ мм (в среднем на 12 %).

Таблица 3.2 – Основные характеристики минеральных наполнителей из отходов топливно-энергетической промышленности

№ п/п	Наименование производителя техногенного сырья	Содержание частиц, % по массе: – мельче 1,25 мм; – мельче 0,315 мм; – мельче 0,071 мм	Удельная поверхность по данным ПСХ-12(SР), м ² /кг	Пористость, %	Показатель битумоемкости, г/100 см ³	Средняя плотность, г/см ³ *	Истинная плотность, г/см ³ *	Насыпная плотность, г/см ³ *	Влажность, %
1	Троицкая ГРЭС (РФ)	100; 99,4; 79	492	43	84	1,20	2,11	0,80	0,27
2	Рефтинская ГРЭС (РФ)	100; 99,4; 76,3	327	36	51	1,30	2,02	1,05	0,15
3	Новотроицкая ТЭС (РФ)	100; 99; 63,3	301	42	75	1,20	2,08	0,98	0,59
4	WE Energies (WEE)(США)	100; 100; 92,9	271	35	61	1,60	2,45	1,12	0,25
5	Columbia Ener- gy Center (СЕС) (США)	100; 99,9; 95,3	509	36	81	2,00	3,14	1,42	0,10
6	Назаровская ТЭС (РФ)	100; 99,9; 94,5	449	47	59	1,80	3,37	1,38	0,40
7	Минеральный порошок (МП-1)	100; 94; 83	418	27	42	1,90	2,62	1,35	0,40
8	Требования ГОСТ Р 52129–2003 (марка МП-2)	не менее 95; от 80 до 95; не менее 60	не норм.	не более 40	не более 80	не норм.	не норм.	не норм.	Не более 2,5

*единицы измерения плотности представлены согласно ГОСТ Р 52129–2003

Содержание же частиц $< 0,071$ мм в низкокальциевых золах-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) составило 79; 76,3

и 63,3 % соответственно, что значительно ниже в сравнении с высококальциевыми золами и минеральным порошком.

Оценка зернового состава по стандартной методике позволяет лишь количественно оценить наличие частиц размером $< 1,25$ мм (1250 мкм); $< 0,315$ мм (315 мкм) и $< 0,071$ мм (71 мкм). В связи с этим, целесообразно изучение распределения частиц представленных материалов по размерам с помощью лазерной дифракции на анализаторе размеров частиц FRITSCH Analysette 22 NanoTec plus, который позволяет осуществить оценку дисперсных материалов в диапазоне измерений 0,01–2000 мкм.

В результате проведенного гранулометрического анализа порошкообразных материалов были получены дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц по размерам (рисунок 3.1 и 3.2 соответственно).

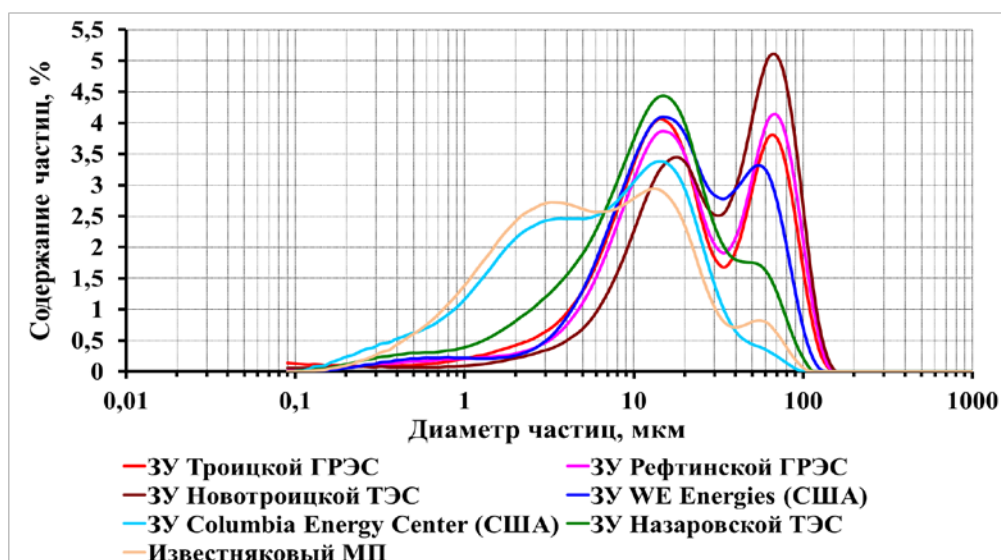


Рисунок 3.1 – Дифференциальные кривые распределения частиц по размерам зол-уноса различного состава

Согласно полученным данным, максимальный размер частиц для всех наполнителей составляет около 100 мкм. При этом характерным является полидисперсное распределение с преобладанием двух и более локальных максимумов в интервале размеров от 0,1 до 100 мкм (рисунок 3.1).

Обращает на себя внимание примерно одинаковый наклон интегральной кривой распределения на всех наполнителях, что свидетельствует о небольших

отличиях в величине разброса размеров частиц (рисунок 3.2). Прослеживается только смещение кривой в сторону меньших размеров при переходе от низкокальциевых зол к высококальциевым. Данные полученные с помощью лазерного анализатора позволяют сделать вывод о том, что высококальциевые золы-уноса более дисперсны по сравнению с низкокальциевыми. Близким по крупности к высококальциевым золам является и известняковый минеральный порошок. Так же обращает на себя внимание тот факт, что в рамках одного типа, топливные золы американского производства по дисперсности превосходят отечественные аналоги. Это, вероятно, связано с более тонким измельчением угольной шихты перед сжиганием за рубежом, а также селективным удалением зол с электрофильтров и хранением этих материалов.

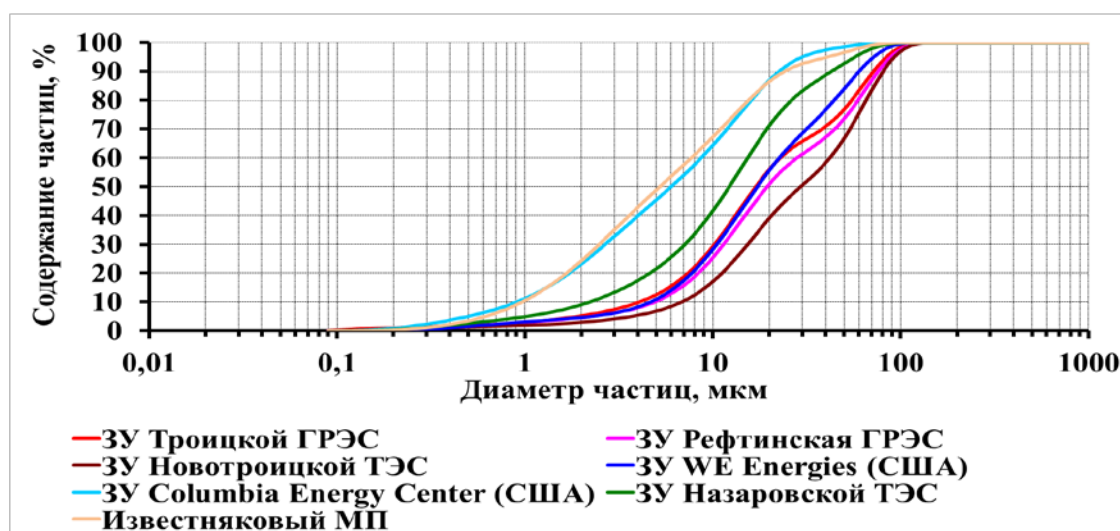


Рисунок 3.2 – Интегральные кривые распределения частиц по размерам зол-уноса различного состава

Для низкокальциевых зол характерно двухмодальное распределение с расположением первого пика в области 60–70 мкм у продуктов отечественного производства и 50–60 мкм у американских аналогов (рисунок 3.1). Второй пик локализован в интервале 14–20 мкм для всех зол с низким содержанием кальция.

Для высококальциевых зол-уноса характерны наиболее существенные различия в распределении между российским и американским производствами. Отличия состоят в интенсивности пиков в областях 6–7, 14–15 и > 40 мкм. Так ЗУ

Columbia Energy Center (США) характеризуется большим количеством зерен размером менее 6–7 мкм и небольшим пиком в области 14–15 мкм, в отличие от ЗУ Назаровской ТЭС (РФ), которая характеризуется большим скачком в области 14–15 мкм и небольшим пиком в области 40–60 мкм. Сравнение кривых известнякового минерального порошка с высококальциевыми золами показало, что известняковый наполнитель имеет незначительные отличия: на 0,5 % уменьшается пик в районе 12–14 мкм, увеличивается содержание частиц менее 7 мкм, и появляется дополнительный небольшой максимум в области 50–60 мкм.

По полученным распределениям также были рассчитаны параметры D_{10} , D_{50} , D_{90} – диаметры, которые соответствуют 10, 50 и 90 %-ному содержанию частиц по интегральной кривой (рисунок 3.3–3.5).

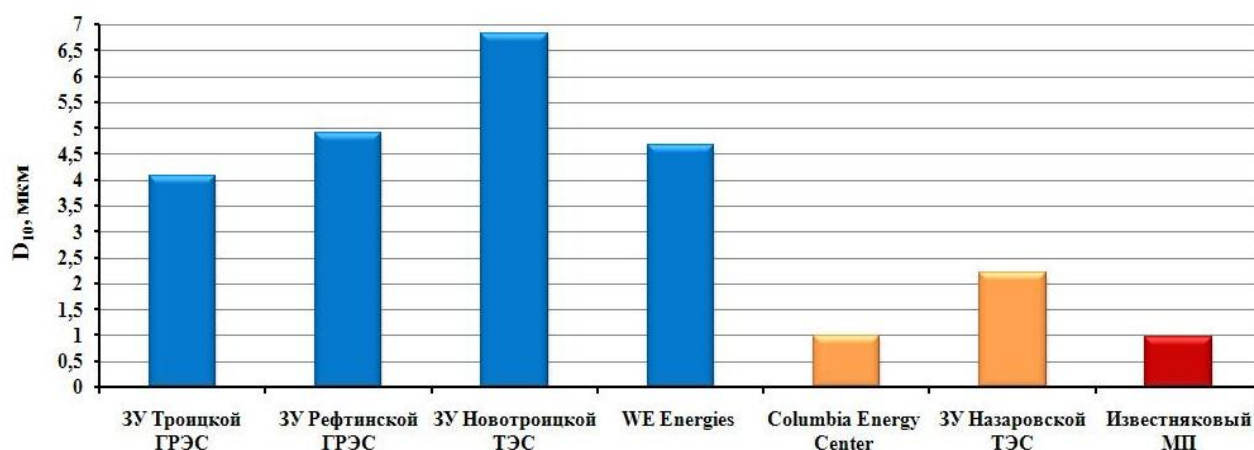


Рисунок 3.3 – Параметр D_{10} , рассчитанный по интегральной кривой распределения

Все отмеченные различия в дисперсности наполнителей подтверждают графики (рисунок 3.3, 3.4). О значительно большем содержании мельчайших частиц размером порядка первых микронов в высококальциевых золах, обусловленных, вероятно, кальций содержащими фазами, свидетельствует параметр D_{10} , который разнится между двумя видами материалов в 1,7–7 раз (рисунок 3.3).

Похожие тенденции наблюдаются на параметрах D_{50} и D_{90} (рисунок 3.4 и 3.5 соответственно).

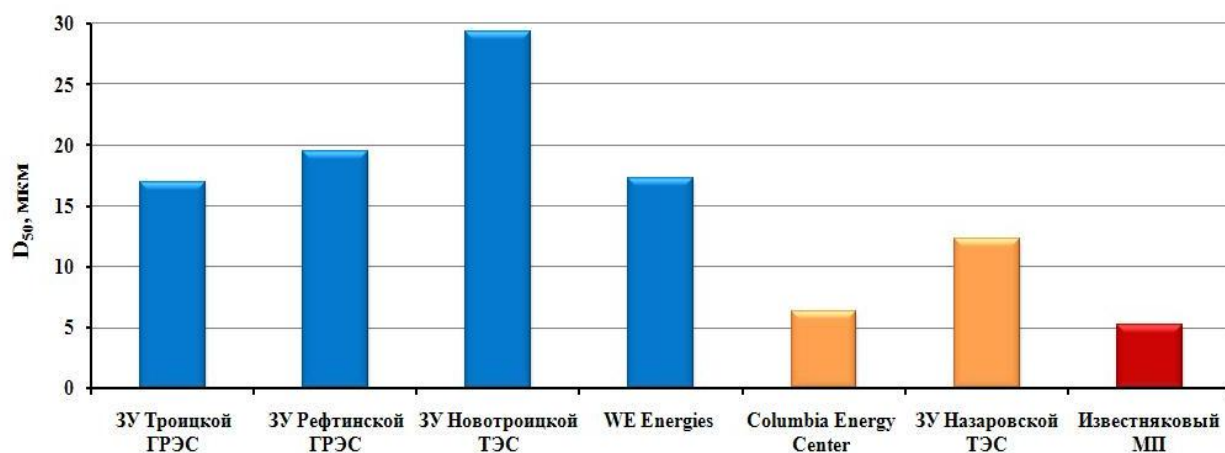


Рисунок 3.4 – Параметр D_{50} , рассчитанный по интегральной кривой распределения

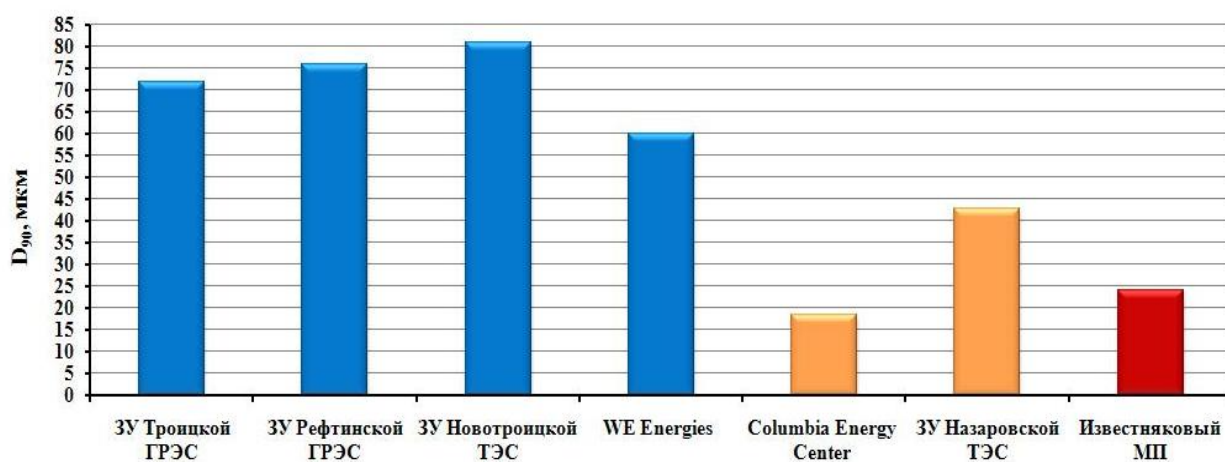


Рисунок 3.5 – Параметр D_{90} , рассчитанный по интегральной кривой распределения

Незначительные отклонения наблюдаются у ЗУ Троицкой ГРЭС и WE Energies (США) в величине D_{50} и ЗУ Назаровской ТЭС в D_{90} , характеризующиеся небольшой погрешностью (не более 2,5 %) и позволяющие говорить о близкой дисперсности рассматриваемых зол.

Обращает на себя внимание высокая дисперсность золы-уноса Columbia Energy Center (США), в которой 90 % частиц мельче 18,6 мкм (рисунок 3.5). Этот же параметр для высококальциевой золы отечественного производства составляет 42,8 мкм, что может быть связано с тонкостью измельчения угольного топлива. D_{90} для низкокальциевых зол составляет от 60 до 80 мкм.

Анализ данных распределения частиц по размерам позволяет сделать вывод о схожести фракционного состава высококальциевых зол-уноса с известняковым минеральным порошком и большей их дисперсностью в сравнении с низкокальциевыми.

Удельная поверхность, так же является одной из важнейших характеристик, позволяющих установить структурирующую способность материала в качестве модифицирующей добавки битума. Определение величин удельной поверхности осуществлялось тремя способами (рисунок 3.6): с помощью прибора ПСХ-12(SP); расчет значений удельной поверхности на основе данных полученных по распределению частиц по размерам с помощью лазерной дифракции (ЛД) на приборе FRITSCH Analysette 22 NanoTec plus; с помощью прибора Сорби-М, позволяющего учесть поры открытого и закрытого характера в общей пористости материалов.

Анализ полученных данных величин удельной поверхности на приборе ПСХ-12(SP) (таблица 3.2, рисунок 3.6) позволяет сделать вывод о том, что высоко-кальциевые золы-уноса (образцы № 5, 6 в соответствии с таблицей 2.7, 3.2) являются более дисперсными в сравнении с низкокальциевыми (образцы № 2–4 в соответствии с таблицей 2.7, 3.2). Среди низкокальциевых выделяется ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ). Ее удельная поверхность сопоставима с высококальциевыми и составляет $492 \text{ м}^2/\text{кг}$, что на 10 % выше значения удельной поверхности ЗУ Назаровской ТЭС (РФ), на 4 % ниже удельной поверхности ЗУ Columbia Energy Center (США) и на 15 % превышает значение удельной поверхности минерального порошка из известняка.

В соответствии с ранее изученными распределениями частиц по размерам с помощью лазерной дифракции был произведен расчет удельной поверхности. Значения удельной поверхности коррелируют с данными полученными на приборе ПСХ, но отмечается некоторое их увеличение. Данный факт обуславливается тем, что прибор учитывает частицы в диапазоне 0,1–2000 мкм, а по факту 0,08–110 мкм не усредняя их размер.

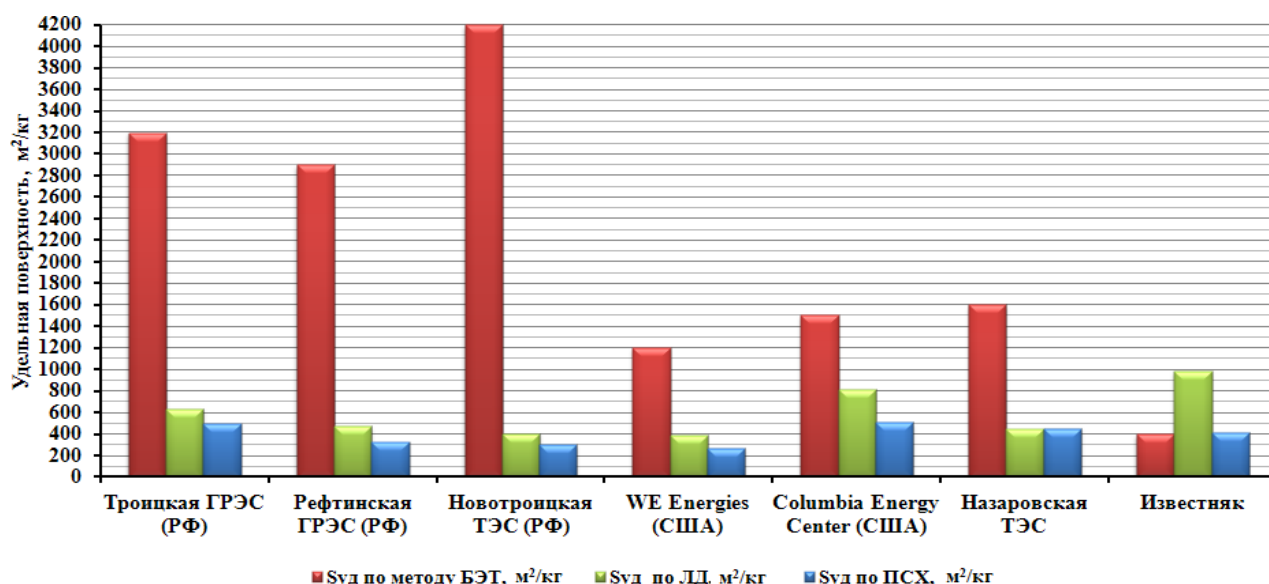


Рисунок 3.6 – Удельная поверхность исследуемого техногенного сырья

Стоит отметить, что в соответствии с полученными значениями низкокальциевые золы уступают высококальциевым в величине удельной поверхности. Среди низкокальциевых зол заметно выделяется ЗУ Троицкой ГРЭС, имеющая наибольшую удельную поверхность. Это можно объяснить достаточно большим содержанием в ней частиц размером менее 1 мкм, обладающих высокой площадью удельной поверхности (рисунок 3.1).

Однако, рассматривая процессы взаимодействия минеральных наполнителей с органическим вяжущим, важно учитывать их пористость. Анализ активной удельной поверхности техногенного сырья, определенной на приборе Сорби-М с учетом пористости материалов (рисунок 3.7) и ее сравнение с описанными выше способами позволяют сделать вывод о том, что площади удельной поверхности различаются в несколько раз (рисунок 3.6).

Для зол-уноса Новотроицкой ТЭС (РФ), Троицкой ГРЭС (РФ) и Рефтинской ГРЭС (РФ) характерен резкий скачок значений удельной активной поверхности, что обусловлено высоким содержанием (69, 38 и 44 %) нанопор размером 80, 51 и 80 нм. При этом золы-уноса WE Energies (США), Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) характеризуются лишь небольшим ее увеличением. Этот

факт объясняется содержанием пор (87, 62 и 60 %) меньшего диаметра – 15, 51 и 65 нм.

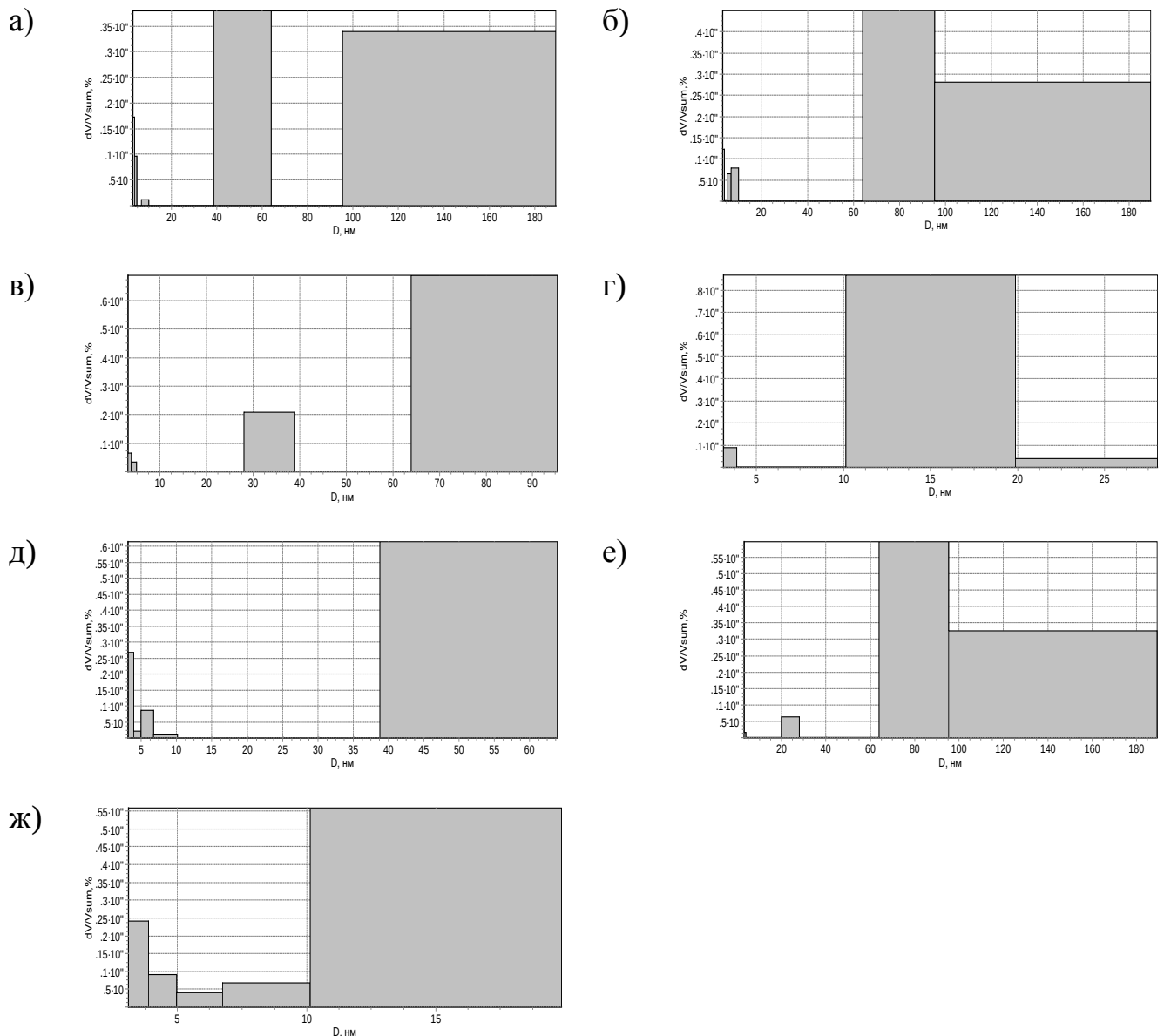


Рисунок 3.7 – Нанопористость зол-уноса различного состава:

- а) ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ); б) ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ);
- в) ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ); г) ЗУ WE Energies (США);
- д) ЗУ Columbia Energy Center (США); е) ЗУ Назаровской ТЭС (РФ);
- ж) известняковый минеральный порошок.

Таким образом, золы-уноса Columbia Energy Center (США), Троицкой ГРЭС (РФ) и Назаровской ТЭС (РФ) имеют наибольшую удельную поверхность по данным ЛД и ПСХ, а значит обладают большей дисперсностью.

С увеличением площади удельной поверхности увеличится и структурирующая способность зол, при этом, возможно, будет расти требуемое количество вяжущего для создания пленки на поверхности всех зерен, что приведет и к повышению вязкости битума при одинаковом наполнении исследуемыми материалами. Однако по данным активной удельной поверхности с учетом нанопористости материала наибольшими значениями обладают золы-уноса Новотроицкой ТЭС (РФ), Троицкой ГРЭС (РФ) и Рефтинской ГРЭС (РФ) и их взаимодействие с битумом будет обусловлено большим размером пор, который будет способствовать физической адсорбции материалов.

Наряду с изученными физико-механическими характеристиками зол-уноса пористость является решающей характеристикой в процессах взаимодействия с битумом и оказывает значительное влияние на количество его потребления. Определение значений пористости осуществлялось в соответствии со стандартной методикой [46]. Полученные данные (таблица 3.2.) позволяют сделать вывод о том, что пористость исследуемых образцов зол-уноса превышает пористость известнякового минерального порошка на 15–43 %. При этом, стоит отметить, что значения пористости ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ), ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) и ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) – 42, 43 и 47 % соответственно – превышают норму по ГОСТ [46] на 2, 3 и 7 %.

Использование пористых материалов для получения органоминеральных композиций для дорожного строительства приводит к значительному увеличению расхода битума [205]. Однако рациональное использование пористых наполнителей в битумоминеральных композициях для дорожного строительства позволяет улучшить физико-механические и эксплуатационные (тепло- и трещиностойкость) характеристики композита [27, 28, 44, 205–218].

Анализ данных пористости исследуемых материалов и их битумоемкости, показывает, что эти характеристики обладают прямой зависимостью, т.е. с увеличением пористости увеличивается и показатель битумоемкости. Такая тенденция соблюдается для всех видов зол, за исключением золы-уноса Назаровской ТЭС

(РФ) (рисунок 3.8). При относительно высокой пористости 47 % показатель битумоемкости составляет лишь 36 г/100 см³.

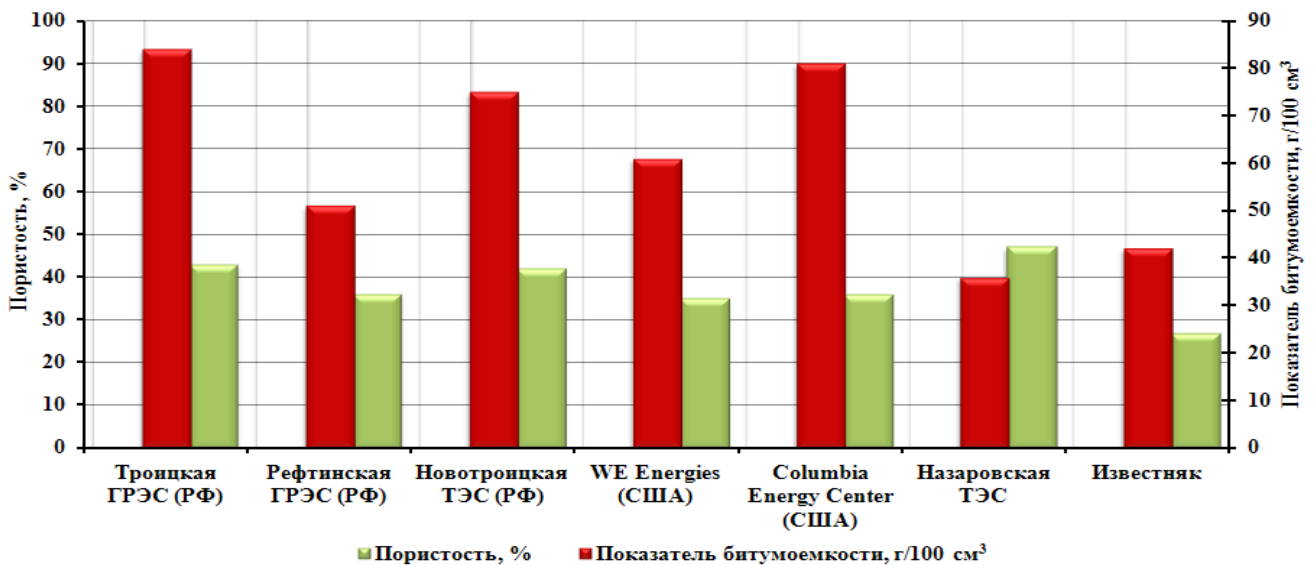


Рисунок 3.8 – Зависимость показателя битумоемкости зол-уноса от пористости

Для оценки взаимосвязи показателей битумоемкости и пористости остальных представителей зол-уноса относительно известнякового минерального порошка необходимо ввести такое понятие, как коэффициент битумоемкости ($K_{\text{БИТ}}$), определяемый по формуле 3.1:

$$K_{\text{БИТ}} = \left(\frac{(B_x - P_x) \times 100}{B_{\text{ИМП}} - P_{\text{ИМП}}} \right) \div 100; \quad (3.1)$$

где B_x – битумоемкость, исследуемого образца;

P_x – пористость, исследуемого образца;

$B_{\text{ИМП}}$ – битумоемкость известнякового минерального порошка;

$P_{\text{ИМП}}$ – пористость известнякового минерального порошка.

Для минерального порошка из известняка $K_{\text{БИТ}}$ составил 1, такой же коэффициент битумоемкости характерен и для ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ). Но золы Новотроицкой ТЭС (РФ), Троицкой ГРЭС (РФ), WE Energies (США) и Columbia Energy Center (США) характеризуются резкими скачками показателя битумоемкости. Пористость низкокальциевых ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ), Троицкой ГРЭС

(РФ), WE Energies (США) составила 42, 43 и 35 % соответственно, при этом значения $K_{\text{БИТ}}$ равны 2,2; 2,73 и 1,73 соответственно.

Отличается между собой и техногенное сырье зарубежного производства – ЗУ WE Energies (США) и Columbia Energy Center (США), пористость которых составляет 35 и 36 % соответственно, тогда как $K_{\text{БИТ}}$ для этих зол равен 1,73 и 3 (разница в коэффициентах почти в 2 раза). Такое поведение техногенного сырья объясняют размеры нанопор в общей пористости материалов. ЗУ WE Energies (США) характеризуется преобладанием пор диаметром 15 нм, в отличие от ЗУ Columbia Energy Center (США) с преобладанием пор диаметром 51 нм.

Таким образом, проведенный анализ совокупности физико-механических характеристик, исследуемых образцов зол-уноса, позволяет выстроить их в последовательности (таблица 3.3). Совокупность изученных характеристик позволяет оценить эффективность использования зол-уноса с точки зрения структурирования битума и выстроить их в следующем порядке по возрастанию степени эффективности: ЗУ WE Energies (США) → ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) → ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) → ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) → ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) → ЗУ Columbia Energy Center (США).

Исследование физико-механических характеристик с использованием стандартных и альтернативных методов позволило проанализировать наиболее значимые свойства (удельную поверхность, пористость, битумоемкость и распределение частиц по размерам) изучаемых в данной работе отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса отечественных и зарубежных производителей, установить возможность их использования в качестве структурирующей добавки к битуму, а также дать прогнозную оценку и проранжировать техногенное сырье по степени эффективности его использования в битумо-минеральных композициях для дорожного строительства. Однако, наряду с физико-механическими свойствами, стоит уделить отдельное внимание физико-химическим характеристикам и состоянию поверхности техногенного сырья.

Таблица 3.3 – Ранжирование зол-уноса в зависимости от значений физико-механических характеристик

Наименование характеристики	Последовательность изменения характеристик зол-уноса ¹⁴					
	1	2	3	4	5	6
Содержание естественных радионуклидов	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	WE Energies (США)	Columbia Energy Center (США)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)
Дисперсность по данным ситового метода	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	Columbia Energy Center (США)	WE Energies (США)
Дисперсность по данным лазерной дифракции	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	WE Energies (США)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	Columbia Energy Center (США)
Удельная поверхность по данным ПСХ	WE Energies (США)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	Columbia Energy Center (США)
Удельная поверхность по данным лазерной дифракции	WE Energies (США)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	Columbia Energy Center (США)
Удельная активная поверхность по данным Сорби-М	WE Energies (США)	Columbia Energy Center (США)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)
Пористость	WE Energies (США)	Columbia Energy Center (США)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)
Средний размер пор в общей пористости материала	WE Energies (США)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	Columbia Energy Center (США)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)
Показатель битумоёмкости	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	WE Energies (США)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	Columbia Energy Center (США)	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)

¹⁴ Золоы расположены под номерами от 1 до 6 в порядке увеличения того или иного показателя

3.2. Состав и физико-химические особенности зол-уноса

Согласно полученным результатам оценки физико-механических характеристик отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса, можно сделать вывод о перспективности использования данного вида сырья при производстве битумоминеральных композиций дорожно-строительного назначения. Однако решающую роль в процессах структурообразования композита с использованием столь специфичного сырья может сыграть химический и минеральный составы, зависящие от вида сжигаемого топлива, технологии сжигания, способа улавливания и удаления.

В процессе сжигания топливо подвергается воздействию высоких температур (1100–1600 °С), которые способствуют протеканию сложных физико-химических процессов, в результате чего минеральные примеси претерпевают изменения. Этим обусловлена сложность химического и минерального составов зол [219]. Кроме того, золы уноса характеризуются содержанием несгоревших частиц органического топлива, количество которых определяется потерями при прокаливании и в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003 [46] их количество не должно превышать 20 % массы.

В общем виде золы-уноса представляют собой сложное вещество, включающее органическую и неорганическую составляющие. В свою очередь, неорганическая составляющая представляет собой аморфную и кристаллическую фазы. Аморфная состоит из алюмосиликатной стеклофазы, а кристаллическая включает в себя слабоизмененные зерна минералов исходного топлива (кварц, полевые шпаты и др.) и кристаллические новообразования, включающие муллит, гематит и др.

Химический анализ алюмосиликатного техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса различного состава проводился с помощью спектральных методов, при этом учитывались потери при прокаливании (0,7–4,95 %) (таблица 3.4). Полученные данные приведены в пересчете на 100 %. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что исследуе-

мое техногенное сырье характеризуется высоким содержанием оксида кремния SiO_2 (30,03–62,53 %) и оксида алюминия Al_2O_3 (8,84–30,92 %).

Таблица 3.4 – Данные химического анализа техногенного сырья

Наименование составляющих	Наименование золы						Известняк
	Низкокальциевые				Высококальциевые		
	Троицкая ГРЭС (РФ)	Рефтинская ГРЭС (РФ)	Новотроицкая ТЭС (РФ)	WE Energies (США)	Columbia Energy Center (США)	Назаровская ТЭС (РФ)	
ппп	4,95	1,9	4,85	1,9	0,7	3,15	39,1
SiO ₂	62,53	60,2	56,2	47,83	30,03	31,55	3,14
Al ₂ O ₃	28,75	30,92	27,7	28,7	20,68	8,84	1,12
CaO	0,612	1,28	1,35	3,36	26,63	37,80	51,42+41,89 CO ₂
Fe ₂ O ₃	4,1	3,35	6,18	13,16	4,67	8,99	0,534
SO ₃	0,209	0,153	0,102	1,42	2,01	4,40	0,026
MgO	1,06	0,577	4,64	1,04	7,60	6,31	1,43
Na ₂ O	1,05	0,525	1,16	0,874	3,34	0,761	0,035
K ₂ O	0,291	0,750	1,18	1,65	0,391	0,204	0,162
TiO ₂	0,588	1,17	0,684	1,07	1,29	0,261	0,026
P ₂ O ₅	0,485	0,482	0,358	0,476	2,19	–	–
RuO ₄	0,028	0,219	0,014	–	–	–	–
BaO	–	–	–	–	0,350	0,046	–
SrO	0,042	–	–	–	0,355	0,185	0,032
F	–	–	–	–	0,213	–	–
MnO	0,082	–	0,061	–	–	0,368	0,011

С помощью качественного рентгенофазового анализа был определен фазовый и минеральный составы техногенного сырья из отходов топливно энергетических предприятий. Все исследуемые образцы алюмосиликатного техногенного сырья характеризуются высоким содержанием рентгеноаморфной фазы, которая приводит к появлению сложной линии фона на рентгенограммах (рисунок 3.9). Использование полнопрофильного РФА с применением алгоритма расчета Ритвельда зачастую не позволяет корректно аппроксимировать линию фона, в связи с этим использовалась программа DDM, реализующая алгоритм Derivative Difference Minimization [196], который основан на минимизации локальных производных разностной кривой экспериментального и рассчитанного дифракционного спектра.

Полученные результаты полнопрофильного количественного РФА, исследуемых представителей отходов топливно-энергетических предприятий представлены на рисунке 3.9 и в таблице 3.5.

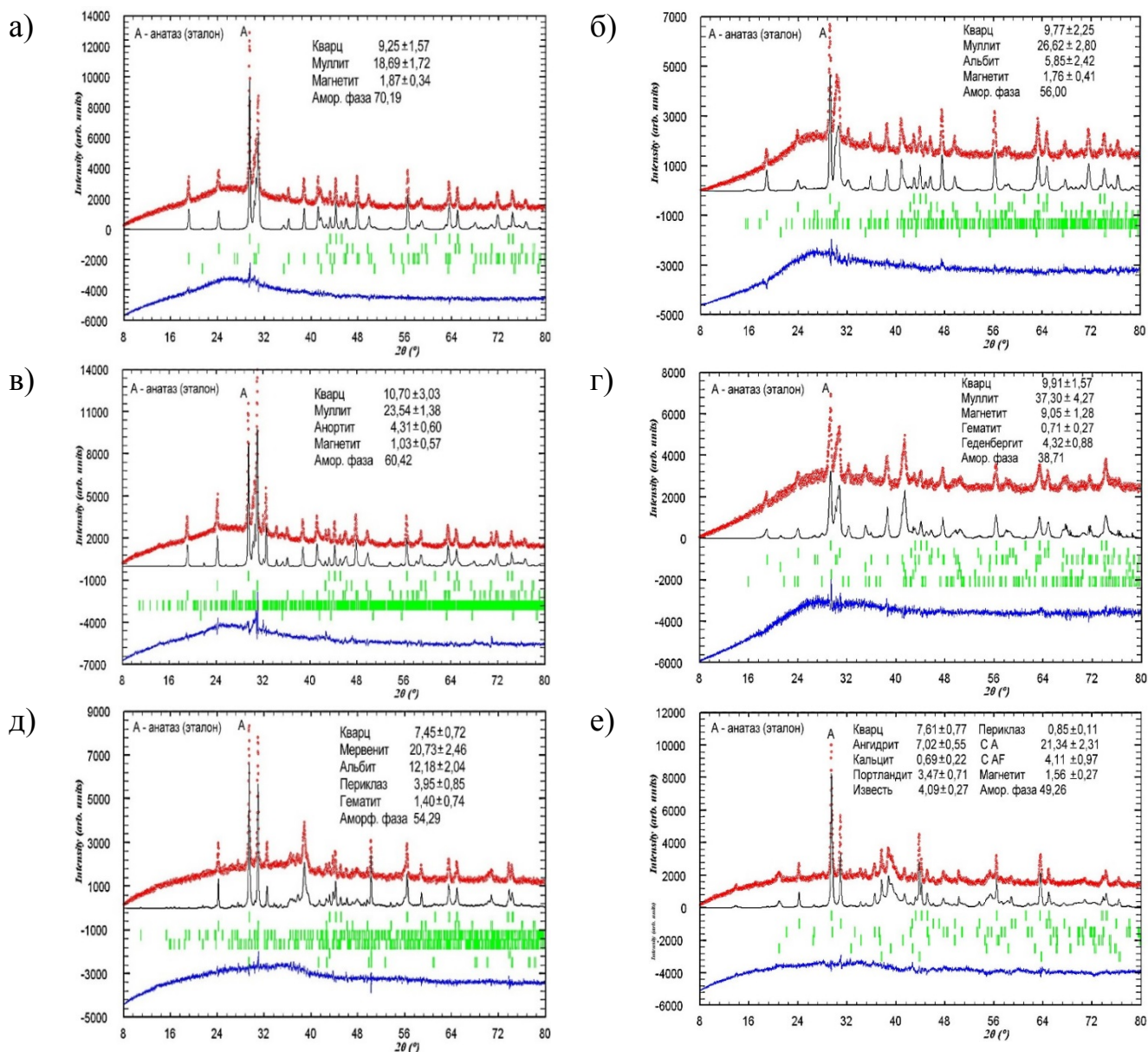


Рисунок 3.9 – Результаты полнопрофильного расчета рентгенограмм, исследуемых зол-уноса: а) ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ); б) ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ); в) ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ); г) ЗУ WE Energies (США); д) ЗУ Columbia Energy Center (США); е) ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)

Исходя из полученных данных минерального состава исследуемых представителей высококальциевых и низкокальциевых зол-уноса отечественного и зарубежного производства видно, что рентгеноаморфная фаза составляет 38,69–62,6 %

(таблица 3.5). В виду того, что рентгеноаморфная (RAS) стеклофаза образована оксидами кремния и алюминия, комплекс которых при одинаковой координации увеличивает «минусовой» заряд и дает существенный отрицательный потенциал поверхности материала, можно предположить, что золы-уноса будут активно взаимодействовать с положительно заряженными молекулами битума. Кроме того, активность взаимодействия в бинарной системе «битум – зола-уноса» будет напрямую зависеть от содержания стеклофазы, и, чем больше ее в составе золы, тем более активным будет взаимодействие.

Таблица 3.5 – Минералогический состав исследуемых зол-уноса

Наименование составляющих	Наименование золы					
	Низкокальциевые				Высококальциевые	
	Троицкая ГРЭС (РФ)	Рефтинская ГРЭС (РФ)	Новотроицкая ТЭС (РФ)	WE Energies (США)	Columbia Energy Center (США)	Назаровская ТЭС (РФ)
RAS	70,1	62,6	60,5	38,69	55,78	49,24
Кварц	9,3	6,3	10,7	9,92	7,24	7,61
Муллит	18,7	25,6	23,5	37,30	–	
Анортит	–	–	4,3	–	–	
Магнетит	1,9	1,8	1	9,06	–	1,56
Альбит	–	3,9	–	–	11,26	–
Гематит	–	–	–	0,71	1,33	–
Мервинит	–	–	–	–	20,70	–
Геденбертит	–	–	–	4,32	–	–
Периклаз	–	–	–	–	3,69	–
Ангидрит	–	–	–	–	–	7,02
Кальцит	–	–	–	–	–	0,69
Портландит	–	–	–	–	–	3,47
Известь	–	–	–	–	–	4,09
Периклаз	–	–	–	–	–	0,85
Трехкальциевый алюминат	–	–	–	–	–	21,35
Четырехкальциевый алюмоферрит	–	–	–	–	–	4,12

Таким образом, на основании полученных данных (таблица 3.5) наиболее активной среди низкокальциевых является ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), среди высококальциевых ЗУ Columbia Energy Center (США). Однако, в виду того, что в составе ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) выявлено наличие извести, которая наряду с

алюмосиликатной составляющей обладает достаточно высокой активностью (RAS + Известь = 53,33 %), можно предположить, что характер влияния высококальцевой золы зарубежного и отечественного производства на свойства битума будет лишь незначительно отличаться. Активность высококальцевых зол-уноса в сравнении с низкокальцевыми, количество стеклофазы в которых больше, может компенсироваться бóльшим содержанием оксида кальция.

Стоит отметить, что степень полимеризации (Q) золы определяет степень активности стеклофазы, и, чем выше этот показатель, тем менее она активна. Анализ полос поглощения полученных с помощью ИК-спектроскопии позволил оценить различия степени полимеризации в стеклофазе рассматриваемых зол-уноса, о чем свидетельствуют изменения в диапазоне волновых чисел 650–1350 cm^{-1} (рисунки 3.10, 3.11).

По полученным ИК-спектрам можно говорить о том, что наиболее высокой степенью полимеризации предположительно обладают высококальцевые золы-уноса, о чем свидетельствуют ярко выраженные пики в области 800–1200 cm^{-1} . При этом наиболее активной среди высококальцевых следует считать ЗУ Назаровской ТЭС (РФ), характеризующейся наличием кластеров со степенями полимеризации Q^0 , Q^1 , Q^2 и Q^4 в отличие от высококальцевой ЗУ Columbia Energy Center (США), имеющей наиболее ярко выраженный пик в области 800–1000 cm^{-1} , который соответствует степеням полимеризации Q^0 , Q^1 и Q^2 (рисунок 3.3) [197].

Среди низкокальцевых зол-уноса наиболее активными будут ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), в виду того, что у этих образцов отмечается наличие Q^0 , Q^1 и Q^2 степеней полимеризации в диапазоне волновых чисел 800–1000 cm^{-1} , в отличие от ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) и ЗУ WE Energies (США), характеризующимися присутствием лишь Q^3 и Q^4 степеней полимеризации в диапазоне 1000–1200 cm^{-1} .

С целью изучения кислотно-основных свойств зол-уноса различного состава в работе проводился анализ распределения центров адсорбции на поверхности тонкодисперсного техногенного сырья методом адсорбции одноосновных инди-

каторов в диапазоне кислотности от $-4,4$ до $+17,2$ [202]. В указанном диапазоне адсорбция индикатора происходит как на центрах Бренстена, так и на центрах Льюиса, позволяющих получить распределение кислотно-основных центров на поверхности частиц исследуемого материала в виде спектра.

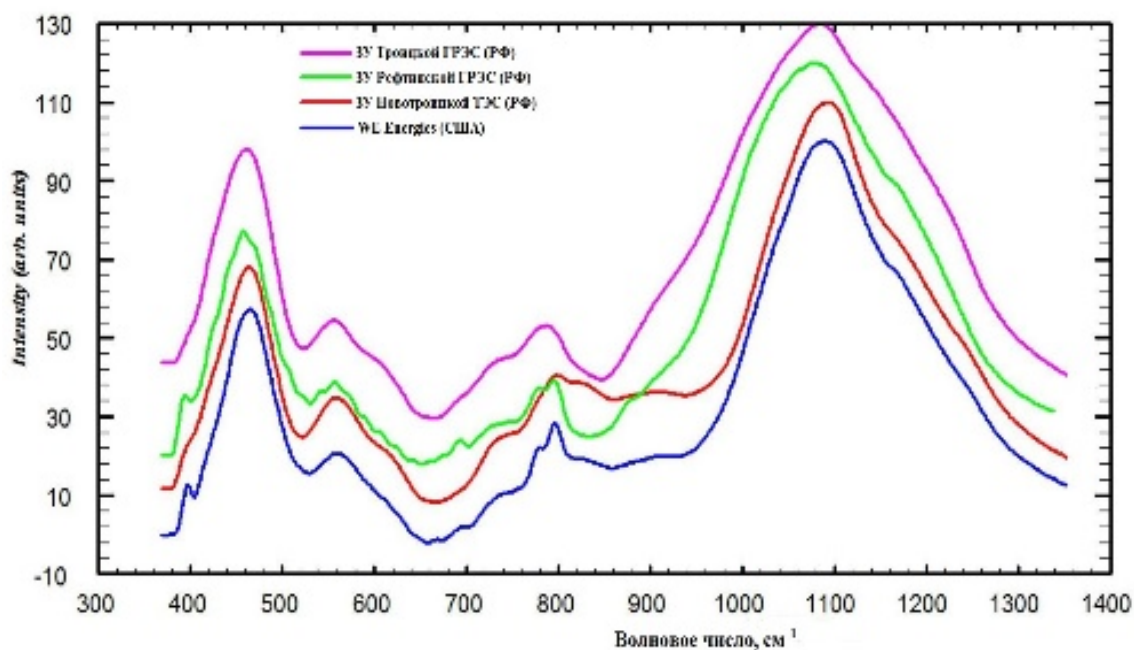


Рисунок 3.10 – ИК-спектры низкокальциевых зол-уноса различного состава

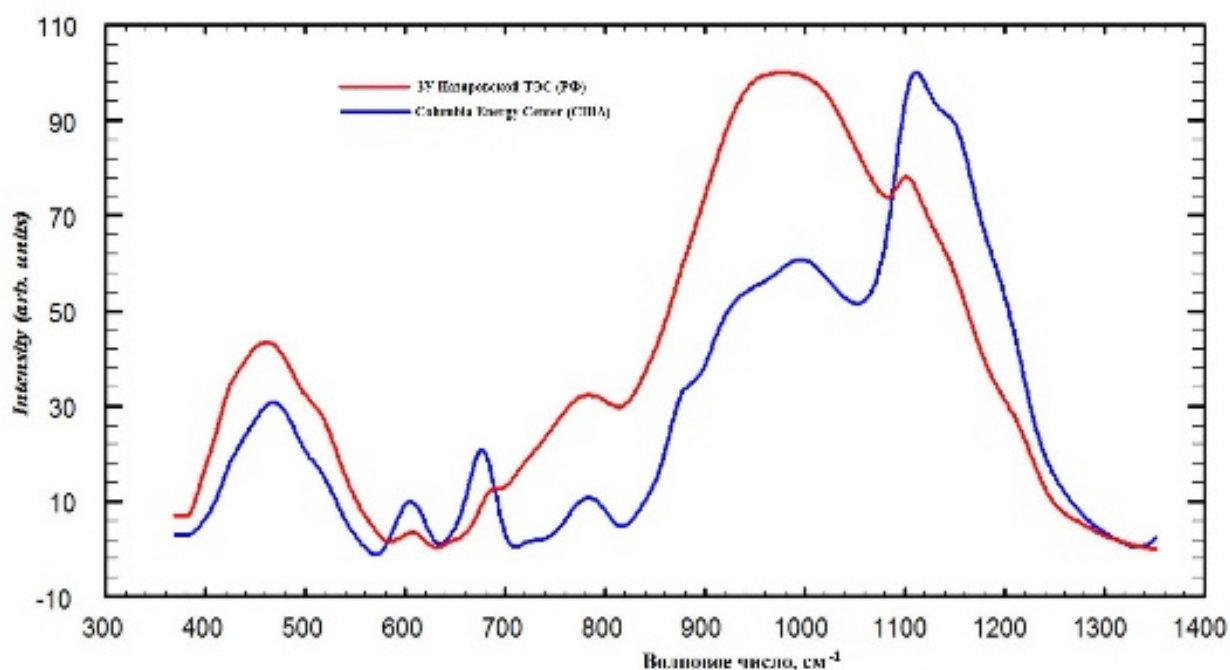


Рисунок 3.11 – ИК-спектры высококальциевых зол-уноса различного состава

Согласно литературным данным [54] активность органического вяжущего в бинарной системе «битум – минеральный наполнитель» определена асфальтогеновыми и нафтеновыми кислотами, т.е. соединениями кислотного характера. Наилучшее взаимодействие в данном случае будут обеспечивать материалы, имеющие значительное количество основных центров.

Анализируя полученные данные (рисунок 3.12, 3.13, таблица 3.6), можно говорить о том, что наибольшей активностью обладает низкокальцевая зола-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ), за счет оснований по Бренстеду ($256,40 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$) и в меньшей степени центрами Льюиса ($40,51 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$), значительно превышающих содержание Бренстедовских и Льюисовских кислотных активных центров. Немного менее активной является зола-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), содержание основных активных центров Льюиса и Бренстеда в которой составляет 29,03 и $143,95 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$. Характер распределения активных центров низкокальцевых зол-уноса Новотроицкой ТЭС (РФ) и WE Energies (США) в области оснований по Бренстеду носят идентичный и их количество составило 162,65 и $168,89 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$. В области оснований по Льюису отмечается заметное расхождение, количество центров адсорбции для ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) – $13,08 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$, а для ЗУ WE Energies (США) – $26,42 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$.

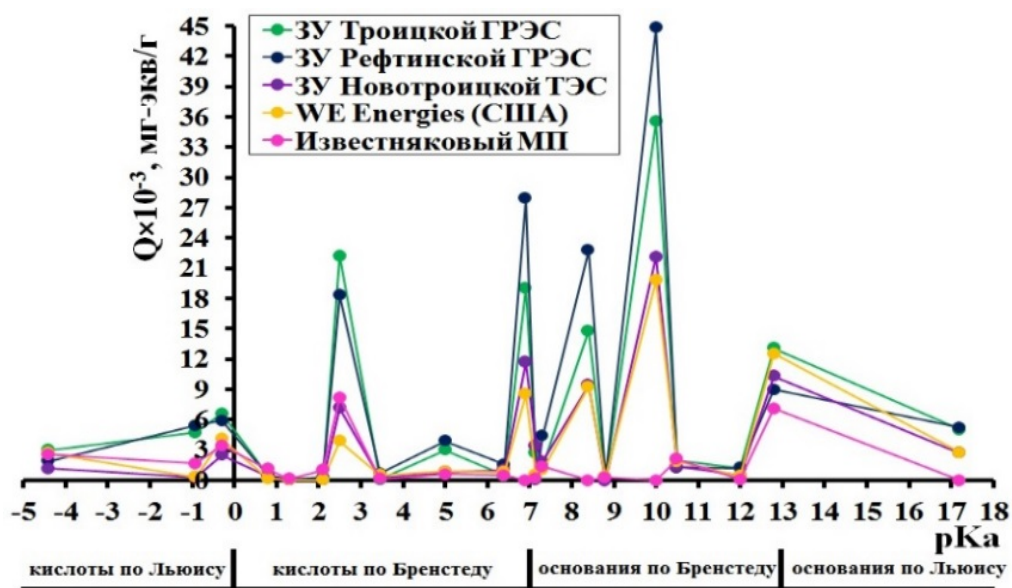


Рисунок 3.12 – Распределение центров адсорбции
на поверхности низкокальцевых зол-уноса

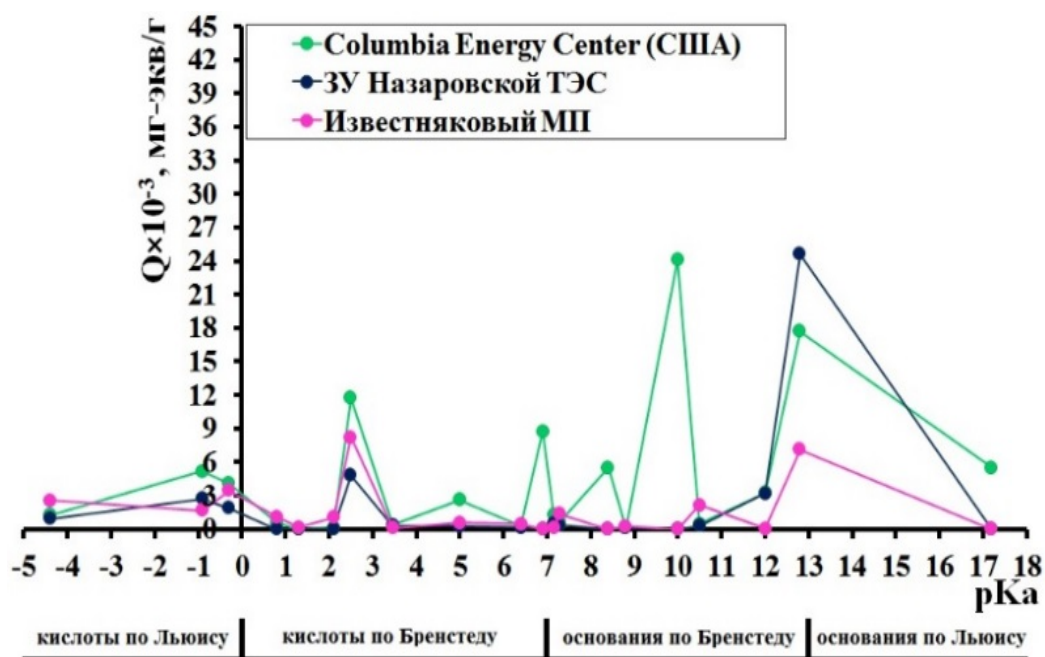


Рисунок 3.13 – Распределение центров адсорбции
на поверхности высококальциевых зол-уноса

Таблица 3.6 – Количество активных центров различной природы
на поверхности частиц зол-уноса различного состава

Наименование исследуемого образца	$S_{уд.}$ по ПСХ, m^2/kg	Количество центров адсорбции, $\times 10^{-3}$ мг·экв/г (мг·экв/ m^2)					H_0
		Основания по Льюису -4,4...0	Кислоты по Бренстеду 0...7	Основания по Бренстеду 7...13	Кислоты по Льюису >13	Общее количество	
ЗУ Троицкой ГРЭС	492	<u>14,3</u> (29,03)	<u>45,42</u> (92,20)	<u>70,91</u> (143,95)	<u>5,05</u> (10,25)	<u>135,68</u> (275,43)	7,28
ЗУ Рефтинской ГРЭС	327	<u>13,24</u> (40,51)	<u>53,32</u> (163,16)	<u>83,79</u> (256,40)	<u>5,24</u> (16,03)	<u>155,59</u> (476,10)	7,48
ЗУ Новотроицкой ТЭС	300,8	<u>3,94</u> (13,08)	<u>21,39</u> (71,01)	<u>48,99</u> (162,65)	<u>2,7</u> (8,96)	<u>77,02</u> (255,70)	8,33
ЗУ WE Energies (США)	270,6	<u>7,16</u> (26,42)	<u>14,93</u> (55,09)	<u>45,77</u> (168,89)	<u>2,75</u> (10,15)	<u>70,61</u> (260,55)	8,35
ЗУ Columbia Energy Center (США)	509	<u>10,51</u> (20,65)	<u>24,46</u> (48,05)	53,03 (104,18)	5,51 (10,82)	93,51 (183,71)	8,15
ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	449	<u>7,93</u> (17,66)	<u>4,38</u> (9,76)	<u>27,86</u> (62,04)	0	<u>40,17</u> (89,47)	9,26
Известняковый МП	418	<u>8,75</u> (20,93)	<u>10,53</u> (25,19)	<u>11,12</u> (26,60)	0	<u>30,4</u> (72,7)	4,74

В случае с высококальциевыми золами-уноса наиболее активной является зола-уноса зарубежного производства Columbia Energy Center (США), количество основных центров адсорбции в области Льюиса составило $104,18 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$, а в области Бренстеда $20,65 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$. Что же касается активных на поверхности ЗУ Назаровской ТЭС (РФ), то их количество значительно ниже чем у остальных представителей, в области Льюиса $17,66 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$, Бренстеда лишь $62,04 \text{ мг}\cdot\text{экв}/\text{м}^2$.

Комплексный анализ состава и кислотно-основных свойств алюмосиликатного техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса ТЭС различного состава позволяет говорить о, том что все исследуемые образцы обладают достаточно высоким потенциалом с точки зрения использования их в качестве структурирующих добавок. Содержание основных оксидов кремния и алюминия в случае с низкокальциевыми, значительное преобладание оксидов кальция и магния для высококальциевых зол, наличие степеней полимеризации и высокое содержание основных активных центров будут способствовать активному взаимодействию минерального наполнителя с битумом. Однако для того, чтобы в полной мере определить эффективность использования и характер взаимодействия зол с битумом необходимо изучить морфоструктурные особенности.

3.3. Микроструктурные особенности зол-уноса с точки зрения применения в качестве наполнителей битумов

Используя разного рода техногенное сырье в строительной отрасли, в частности в битумно-минеральных композициях для дорожного строительства, стоит учитывать ряд особенностей материалов, которые могут способствовать интенсификации адсорбционных процессов. Важную роль при взаимодействии материалов и формировании структуры в бинарной системе «битум – минеральный наполнитель» играют морфологические особенности исследуемых алюмосиликатных наполнителей из отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса.

Микроструктурные особенности, исследуемых в работе 4-х низкокальциевых зол-уноса (Рефтинской ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ), Троицкой ГРЭС (РФ), WE Energies (США) и 2-х высококальциевых Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ)) изучали в лаборатории «Синтеза и следований нано- и микроструктур» Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Согласно полученным микрофотоснимкам техногенного сырья, сформированного в процессе сжигания твердого топлива в виде зол-уноса различных предприятий, можно отметить, что исследуемые образцы представляют собой полифракционные материалы с содержанием частиц различной формы, размер которых колеблется от нескольких микрон до примерно 65 мкм (рисунок 3.14). Редко встречаются частицы с максимальным диаметром до 75 мкм, которые судя по структуре (рисунок 3.14 б) представляют собой спекшиеся частицы золы. При этом основную часть материала представляют сферические частицы размером 5–15 мкм, имеющие гладкую стекловидную поверхность. Содержание таких частиц в золах-уноса отечественного (рисунок 3.14 а, б, в, е) и зарубежного производства (рисунок 3.14 г, д) имеют некоторые отличия.

Это обусловлено различием в подготовке сжигаемого топлива, способа и температуры его сжигания, химического и минерального составов исходного сжигаемого сырья и, как следствие, зольной части, условий удаления зол и т.д.

Высокая дисперсность зол-уноса (о чем свидетельствуют и результаты лазерной дифракции, и значения удельной поверхности) с точки зрения бинарной системы «битум – минеральный наполнитель» позволяет характеризовать их как материалы с высокой структурирующей способностью.

Сравнительный анализ элементного состава техногенного алюмосиликатного сырья, полученного с помощью микроскопа (рисунок 3.15) коррелирует с данными о химическом составе полученными спектральным методом (таблица 3.4 пункт 3.2.), т.е. все исследуемые образцы зол-уноса, не смотря на небольшие колебания, состоят преимущественно из кислорода, кремния и алюминия.

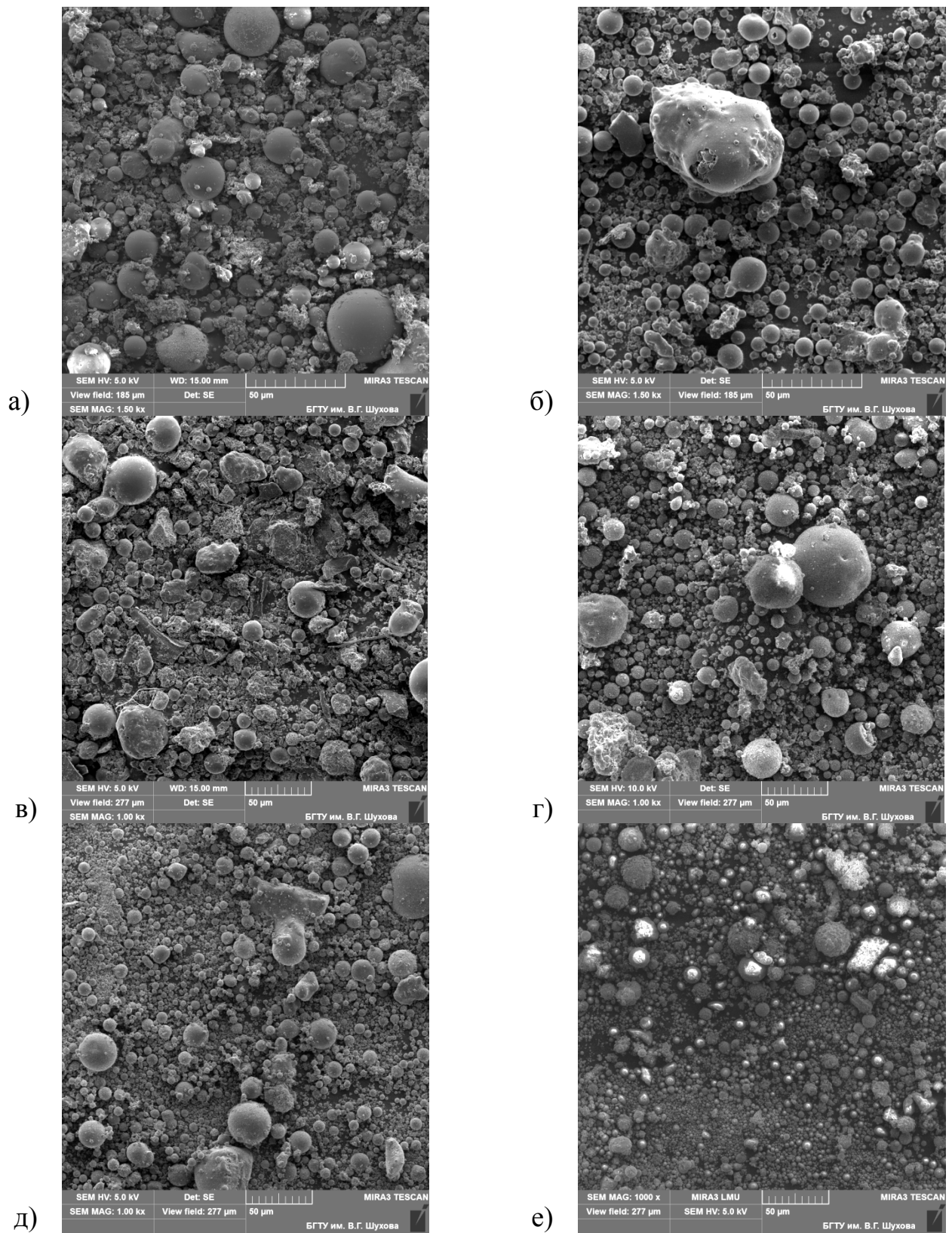


Рисунок 3.14 – Микроструктурные особенности зол-уноса:

- а) ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), б) ЗУ Рефтинской ГРЭС,
 в) ЗУ Новотроицкой ТЭС (Рф), г) WE Energies (США),
 д) Columbia Energy Center (США), е) ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)

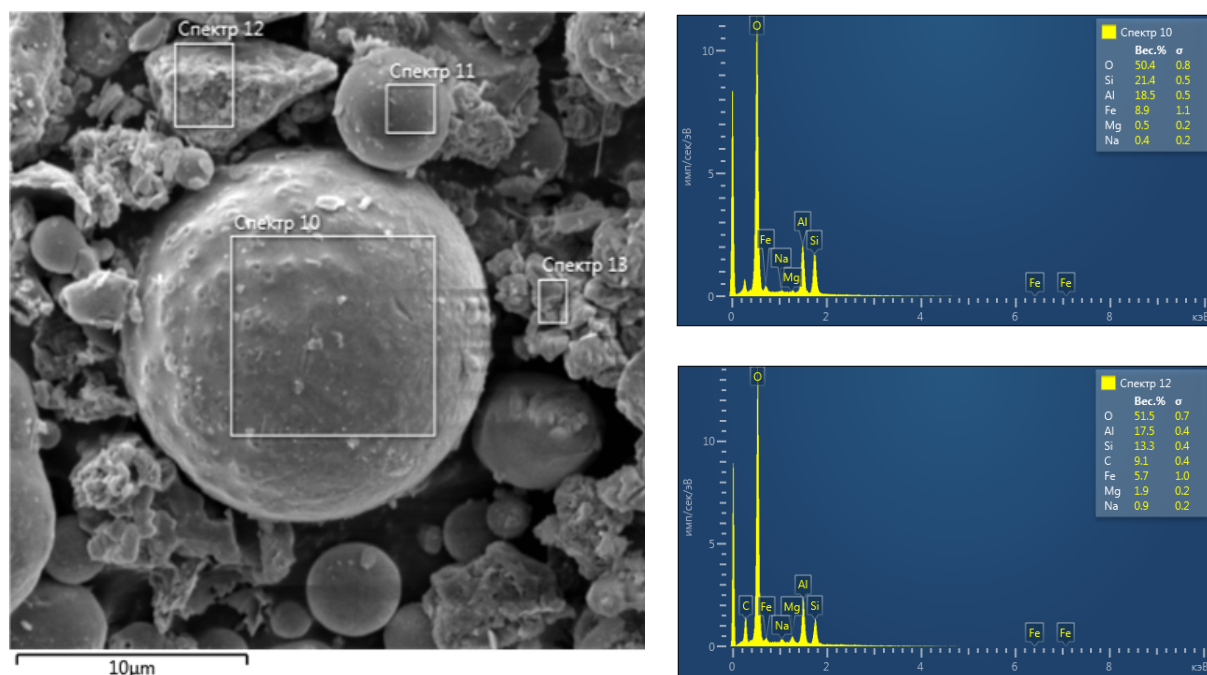


Рисунок 3.15 – Элементный состав золы-уноса Новотроицкой ГРЭС (РФ)

Для зол-уноса Троицкой ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) (рисунок 3.14, а, в) отличительной чертой является большое количество частиц, имеющих различный размер, отличную от шарообразной форму и структуру с развитой поверхностью. Элементный состав таких частиц характеризуется высоким содержанием углерода (рисунок 3.16), и, представляют несгоревшую часть органического топлива. Несгоревшие частицы ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) довольно велики по размеру (около 100 мкм) и имеют ячеистую структуру, по внешнему виду похожую на соты. Очевидно это органические остатки ископаемых микроорганизмов, из которых формировался уголь. Частицы же ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) имеют неопределенную форму и структуру, в большинстве своем имеют вытянутую игловатую форму.

Золы-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ), WE Energies (США) и Назаровской ТЭС (РФ) также характеризуются наличием несгоревших частиц, однако их содержание отличается значительно меньшим количеством. Что же касается высококальциевой золы Columbia Energy Center (США), то в этом материале частицы «недожога» отсутствуют, о чем свидетельствуют низкие потери при прокаливании (таблица 3.4 пункт 3.2).

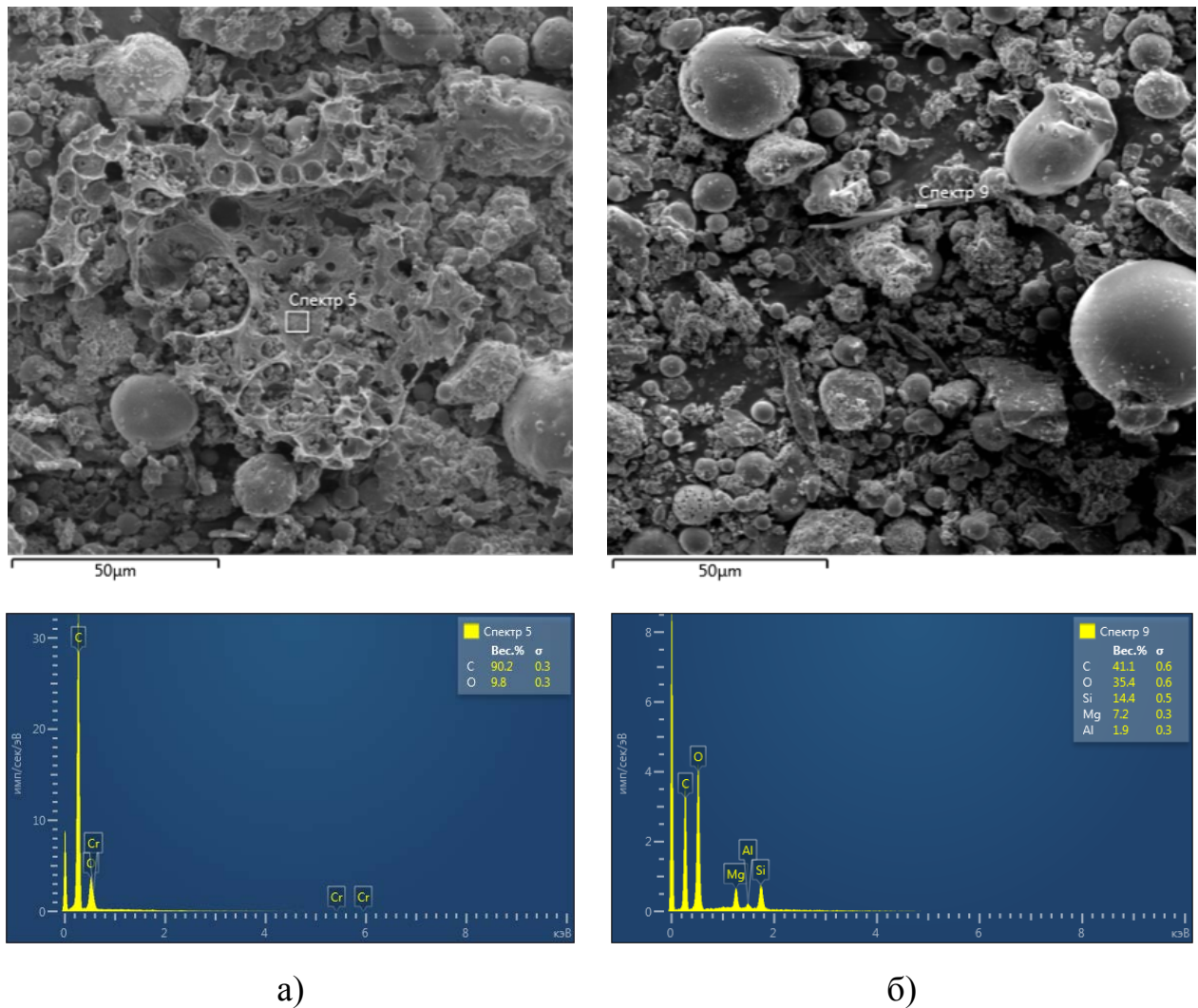


Рисунок 3.16 – Структура и элементный состав частиц неправильной формы в составе зол-уноса: а) Троицкой ГРЭС (РФ); б) Новотроицкой ТЭС (РФ)

Отличия в количестве несгоревших частиц органического топлива в составе исследуемого техногенного сырья объясняется видом применяемого угля и режимами его сжигания на топливно-энергетических предприятиях.

Можно предположить, что присутствие в исследуемых материалах частиц с высоким содержанием углерода лишь положительно повлияет на взаимодействие битума с золами-уноса: во-первых – это будет происходить из-за значительного содержания родственного битуму углерода, позволяющего создавать прочные связи в структуре золобитумного вяжущего; во-вторых, значительное влияние может оказывать развитая поверхность частиц, позволяющая интенсифицировать процессы адсорбции битума и в большей степени структурировать его.

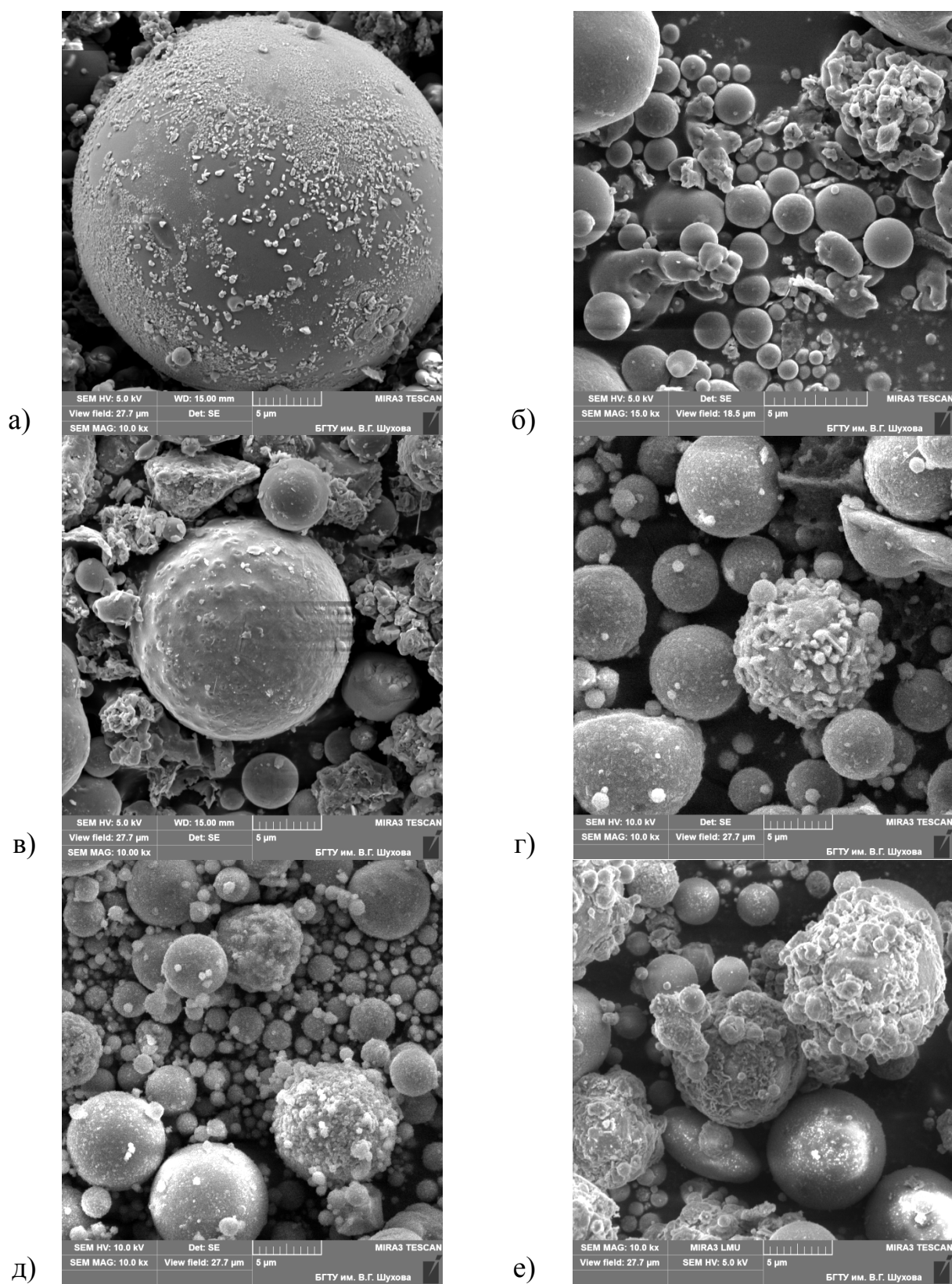


Рисунок 3.17 – Характер поверхности частиц зол-уноса:

- а) ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), б) ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ),
 в) ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ), г) WE Energies (США),
 д) Columbia Energy Center (США), е) ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)

Бóльшее увеличение позволяет рассмотреть на поверхности сферических частиц кристаллические образования кальцийсодержащих фаз. При этом на поверхности низкокальциевых зол (рисунок 3.17 а, б, в, г) кристаллических образований значительно меньше, чем на поверхности высококальциевых (рисунок 3.17 д, е). Некоторые сферические частицы имеют вспученную поверхность, с характерными губчатыми формами (рисунок 3.17, в). Образование таких сфероидов происходит в процессе выделения большого количества газа.

Стоит так же отметить, что среди низкокальциевых представителей значительно отличается ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) (рисунок 3.17, б). Поверхность микросфер данного образца относительно «чистая» и не имеет кристаллических образований, но среди них наблюдаются агломераты из кристаллических соединений.

Высококальциевые золы, как правило, представлены конгломератами из спекшихся сферических и бесформенных кристаллических частиц (рисунок 3.17 д, е). Обращает на себя внимание строение частиц высококальциевой ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Морфология поверхности частиц высококальциевой ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)

Поверхность данного представителя топливно-энергетических отходов отличается высокой развитостью за счет наличия большого количества пор развитой архитектуры наноразмерного уровня (порядка 200 нм и менее). Довольно маленький размер пор этого материала будет способствовать снижению показателя битумоемкости.

Таким образом, изучение микроструктурных особенностей, исследуемых в работе различных по составу представителей отходов топливно-энергетической промышленности позволяет сделать вывод о том, что все они обладают высокой дисперсностью с преимущественным содержанием сферических частиц и развитой морфологией поверхности. Изучение элементного состава и сопоставление его с результатами, полученными различными спектральными методами характеризуют техногенное сырье, как материалы примерно одинакового состава, имеющие небольшие колебания, и, отличающиеся друг от друга различным количеством частиц несгоревшего органического топлива с высоким содержанием углерода. Совокупность полученных данных позволяет предположить, что исследуемые материалы будут иметь высокую реакционную и структурирующую способность при взаимодействии с битумом. Варьирование количеством техногенного сырья в составе золобитумного вяжущего позволит установить максимальный положительный эффект от использования зол-уноса в целях модификации битума.

3.4. Выводы

1. Исследование физико-механических характеристик с использованием стандартных и альтернативных методов позволило проанализировать наиболее значимые свойства (удельную поверхность, пористость, битумоемкость и распределение частиц по размерам) изучаемых в данной работе отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса отечественных и зарубежных производителей, установить возможность их использования в качестве структурирующей добавки к битуму, а также дать прогнозную оценку и проранжировать техногенное сырье по степени эффективности его использования в битумоминальных композициях для дорожного строительства.

2. Комплексный анализ состава и кислотно-основных свойств алюмосиликатного техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса ТЭС различного позволяет говорить о том, что все исследуемые образцы обладают достаточно высоким потенциалом с точки зрения использова-

ния их в качестве структурирующих добавок. Содержание основных оксидов кремния и алюминия в случае с низкокальциевыми, значительное преобладание оксидов кальция и магния для высококальциевых зол, наличие степеней полимеризации и высокое содержание основных активных центров будут способствовать активному взаимодействию минерального наполнителя с битумом.

3. Изучение микроструктурных особенностей, исследуемых в работе различных по составу представителей отходов топливно-энергетической промышленности позволяет сделать вывод о том, что все они обладают высокой дисперсностью с преимущественным содержанием сферических частиц и развитой морфологией поверхности. Изучение элементного состава и сопоставление его с результатами, полученными различными спектральными методами характеризуют техногенное сырье, как материалы примерно одинакового состава, имеющие небольшие колебания, и, отличающиеся друг от друга различным количеством частиц несгоревшего органического топлива с высоким содержанием углерода. Совокупность полученных данных позволяет предположить, что исследуемые материалы будут иметь высокую реакционную и структурирующую способность при взаимодействии с битумом. Варьирование количеством техногенного сырья в составе золобитумного вяжущего позволит установить максимальный положительный эффект от использования зол-уноса в целях модификации битума.

4. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО БИТУМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ЗОЛЫ-УНОСА

Битум является основополагающим компонентом асфальтобетонных смесей, применяемых в дорожно-строительной отрасли, содержание и эксплуатационные характеристики которого определяют прочность, долговечность и способность покрытия к распределению нагрузки. В связи с этим битум, используемый для производства дорожно-строительных материалов, требует детального изучения свойств с применением как стандартных, так и новых методик, и оборудования, позволяющих не только определить его качество, но и прогнозировать работу вяжущего в покрытии.

4.1. Составы и свойства битумов, модифицированных золами-уноса различного состава

Основное назначение добавок к битуму в виде зол-уноса является перевод битума из объемного состояния в пленочное (структурированное), как и в случае взаимодействия битума с минеральным порошком [15, 21], в этой связи по функциональному назначению подобного рода добавки называют структурирующими. Использование дисперсных материалов в качестве добавок к битуму, структурирующих его, позволяют увеличить вязкость битума. Учитывая особенности состава, физико-механические и физико-химические свойства, а также морфоструктурные особенности добавок из отходов топливно-энергетической промышленности по виду взаимодействия с битумом их следует относить к физико-химически модифицирующим добавкам.

Для изучения влияния техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса различного состава на динамику изменения свойств битумов были приняты следующие концентрации – 5, 10 и 15 % от массы вяжущего. Использование добавки к битуму в большем количестве не представляется возможным т.к. будет происходить повышение вязкости би-

нарной системы «битум – зола-уноса», при которой вяжущее теряет способность полноценного смачивания минеральной части асфальтобетонной смеси. Аналогично полимербитумным (ПБВ) и резинобитумным (РБВ) вяжущим, применяемым в дорожном строительстве, битумы с использованием модифицирующей добавки в виде зол-уноса предложено называть золобитумными вяжущими (ЗБВ).

На первом этапе были изучены физико-механические характеристики золобитумных вяжущих. К битумам, применяемым в дорожном строительстве, как исходным, так и модифицированным, предъявляется ряд требований, нормируемых ГОСТ 22245–90 [52]. Наиболее важными являются следующие характеристики (таблица 4.1): глубина проникания иглы (пенетрация), температура размягчения по кольцу и шару, растяжимость (дуктильность), температура хрупкости, индекс пенетрации. В настоящей работе использовался битум нефтяной дорожный марки 60/90 Московского НПЗ.

Основной характеристикой структурно-механических свойств дорожных битумов является вязкость, которая зависит, прежде всего, от температуры и группового состава. Вязкость позволяет характеризовать способность внутренних слоев битума сопротивляться перемещению относительно друг друга.

Однако в соответствии с ГОСТ 11501–78 «Битумы нефтяные. Метод определения глубины проникания иглы» [189] определяют обратную вязкость, т.е. текучесть битума, характеризующуюся условным показателем – глубиной проникания иглы (пенетрацией).

Глубину проникания иглы в битум определяют под действием нагрузки массой 100 г в течение 5 с при температуре +25 °С или при 0 °С под действием нагрузки массой 200 г в течение 60 с. В зависимости от температуры, нагрузки и длительности проникания иглы значение пенетрации существенно изменяется.

Стоит так же отметить, что чем выше пенетрация битума при заданной температуре размягчения и чем выше температура размягчения битума при заданной пенетрации, тем более высокая у него теплостойкость.

Таблица 4.1 – Свойства золобитумных вяжущих

Количество золы-уноса в золобитумном вяжущем	Показатели						
	Глубина проникания иглы, 0,1 мм		Температура размягчения, °С	Растяжимость, см		Температура хрупкости	Индекс пенетрации
	при +25 °С	при 0 °С		при +25 °С	при 0 °С		
Требования ГОСТ 22245–90	61–90	не менее 20	не ниже 47	не менее 55	не менее 3,5	– 15	от – 1,0 до + 1,0
Свойства БНД 60/90	70	21	49	91	3,6	– 16	– 0,5
5 % ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	72	32	50	38	3,5	– 14	– 0,51
10 % ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	56	26	51	33	2,5	– 17	– 0,85
15 % ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	54	24	52	23	2,5	– 15	– 0,64
5 % ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	65	33	50	48	4	– 13	– 0,48
10 % ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	63	30	50	40	3,8	– 13	– 0,51
15 % ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	60	28	51	30	2,8	– 13	– 0,55
5 % ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	68	35	50	46	3,6	– 13	– 0,42
10 % ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	63	33	51	24	3,5	– 17	– 0,35
15 % ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	61	30	52	24	2,9	– 15	– 0,35
5 % WE Energies (США)	56	20	50	43	3,3	– 19	– 1,4
10 % WE Energies (США)	44	18	51	32	3,2	– 18	– 0,69
15 % WE Energies (США)	40	17	51	29	3	– 18	– 1,4
5% Columbia Energy Center (США)	48	27	50	88	3,5	– 16	– 1
10% Columbia Energy Center (США)	47	25	51	69	3,2	– 18	– 1,4
15% Columbia Energy Center (США)	46	25	52	63	3	– 17	– 0,9
5 % ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	50	24	50	84	3,5	– 16	– 1,2
10 % ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	46	21	50	67	3,1	– 17	– 1,5
15% ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)	44	20	51	38	2,8	– 15	– 1,1
5 % известняковый МП	55	36	50	53	4	– 15	– 0,9
10 % известняковый МП	49	34	51	49	3,7	– 16	– 0,99
15 % известняковый МП	42	15	51	31	3,4	– 16	– 0,9

Основываясь на результатах испытаний исходного битума, битума с добавлением известнякового минерального порошка (ИМП) и битума с добавлением зол-уноса различного состава при температуре +25 °С (рисунок 4.1) можно сделать вывод о том, что в зависимости от применяемой структурирующей добавки при одинаковых концентрациях и условиях испытания значение пенетрации претерпевает некоторые изменения.

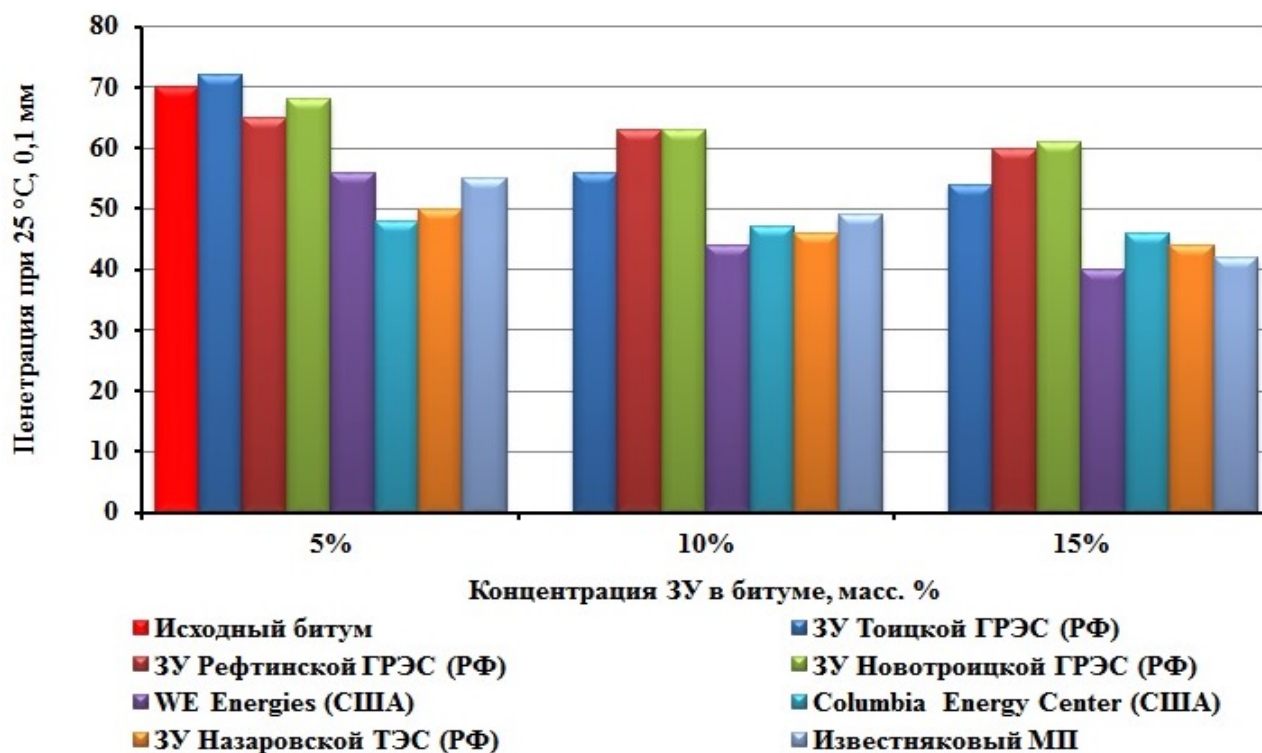


Рисунок 4.1 – Глубина проникания иглы в битум (пенетрация)
при температуре +25 °С

Значение пенетрации при испытании исходного битума при температуре +25 °С составило 70. Использование низкокальциевых зол-уноса Новотроицкой ТЭС (РФ) и Рефтинской ГРЭС (РФ) в количестве 5 % от массы битума позволяет незначительно снизить пенетрацию вяжущего в сравнении с исходным битумом лишь на 3 и 7 % соответственно. При этом значения глубины проникания иглы остаются в пределах для марки битума 60/90. Использование же ЗУ WE Energies (США) в количестве 5 % снижает пенетрацию на 20 %, в то время, как использование 5 % известняка снижает вязкость на 21 %, и позволяет перевести золоби-

тумное вяжущее в более высокую марку 40/60. Исключением является ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), добавление ее в битум в количестве 5 % приводит к повышению значения глубины проникания иглы на 3 %.

При использовании высококальциевых зол-уноса в количестве 5 % снижение пенетрации становится более заметным, в сравнении с низкокальциевыми. Для золы-уноса Columbia Energy Center (США) пенетрация снижается на 31 % в отличие от исходного битума, на 10 % в отличие от битума с известняком и на 11 % в отличие от ЗУ WE Energies (США), которая среди низкокальциевых зол показала себя как самая эффективная. Введение 5 % высококальциевой ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) в битум позволяет снижать пенетрацию на 28 % в отличие от исходного битума, на 7 % в отличие от битума с известняком.

Повышение концентрации зол-уноса в составе вяжущего до 10 % приводит к следующим результатам. Использование ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) снижает пенетрацию на 10 % в сравнении с исходным битумом. Однако значения глубины проникания иглы все так же продолжают соответствовать марке 60/90. При добавлении 10 % ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) в битум пенетрация снижается на 20 %, так вяжущее уже соответствует марке битума по вязкости 40/60, но стремится к верхнему пределу. Введение же ЗУ WE Energies (США) в вяжущее позволяет снизить вязкость на 37 % в сравнении с исходным битумом, что ниже на 7 % в сравнении с известняковым минеральным порошком. В данном случае вяжущее так же переходит из марки 60/90 в более вязкую марку 40/60, при этом значение пенетрации стремится к нижнему пределу.

Введение высококальциевых зол-уноса в битум показывает более стабильные результаты. ЗУ Columbia Energy Center (США) и ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 10 % от массы битума позволяют снизить значения глубин проникания иглы на 33 и 34 % соответственно в сравнении с чистым битумом, в то время как введение 10 % известняка в битум снижает пенетрацию на 30 %.

При использовании зол-уноса в количестве 15 % наблюдаются следующие изменения значений пенетрации. Золы Рефтинской ГРЭС и Новотроицкой ТЭС снижают значения глубины проникания иглы на 14 и 13 % соответственно в срав-

нении с исходным битумом. Однако, не смотря на то, что концентрация зол-уноса в составе вяжущего максимальна марка полученных золобитумных вяжущих соответствует исходному битуму 60/90. Введение ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) снижает вязкость на 23 % в сравнении с исходным битумом и на 3 % в сравнении с концентрацией 10 % этой же золы, при этом вяжущее соответствует марке 40/60. Наиболее эффективная среди низкокальциевых зола-уноса WE Energies (США) при введении 15 % в битум показывает самый высокий и снижает пенетрацию на 43 % в сравнении с исходным битумом, в то время как введение в битум 15 % известняка позволяет снизить вязкость лишь на 40 %. Однако стоит отметить, что значение пенетрации битума с 15 % ЗУ WE Energies (США) равно нижнему пределу марки 40/60.

При введении высококальциевых зол в количестве 15 % в битум отмечается снижение вязкости на 34 % в случае с ЗУ Columbia Energy Center (США) и на 37 % в случае с ЗУ Назаровской ТЭС (РФ), это на 6 и 3 % соответственно выше, чем при введении 15 % известнякового минерального порошка.

Таким образом, исследования динамики изменения значений глубины проникания иглы (пенетрации) битумов, модифицированных золами-уноса ТЭС различного состава при температуре +25 °С показали, что наибольший эффект наблюдается при использовании низкокальциевой ЗУ WE Energies (США) наряду с высококальциевыми золами-уноса Columbia Energy Center (США) и ЗУ Назаровской ТЭС (РФ). Менее эффективными с точки зрения модификации битумов являются золы Рефтинской ГРЭС (РФ), Троицкой ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ). Очевидно значения глубины проникания иглы на прямую зависят от степени дисперсности зол, и чем она выше, тем более вязким становится битум.

Испытания исходного битума, золобитумных вяжущих и битума с добавлением известняка при 0 °С показывают, что значения пенетрации при добавлении всех видов зол-уноса, за исключением ЗУ WE Energies (США), повышаются (рисунк 4.2).

В случае с низкокальциевой золой-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), концентрация ее 5 % от массы битума приводит к увеличению значения пенетрации на 52 %

в сравнении с исходным битумом. Использование ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) при той же концентрации приводит к росту значения глубины проникания иглы на 57 %. При этом значения пенетрации вяжущих с применением зол-уноса указанных производителей при температуре 0 °С соответствуют более жидкой марке 90/130. Наиболее значительный рост наблюдается при использовании 5 % ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) – 67 %, в данном случае значение пенетрации соответствует марке 130/200.

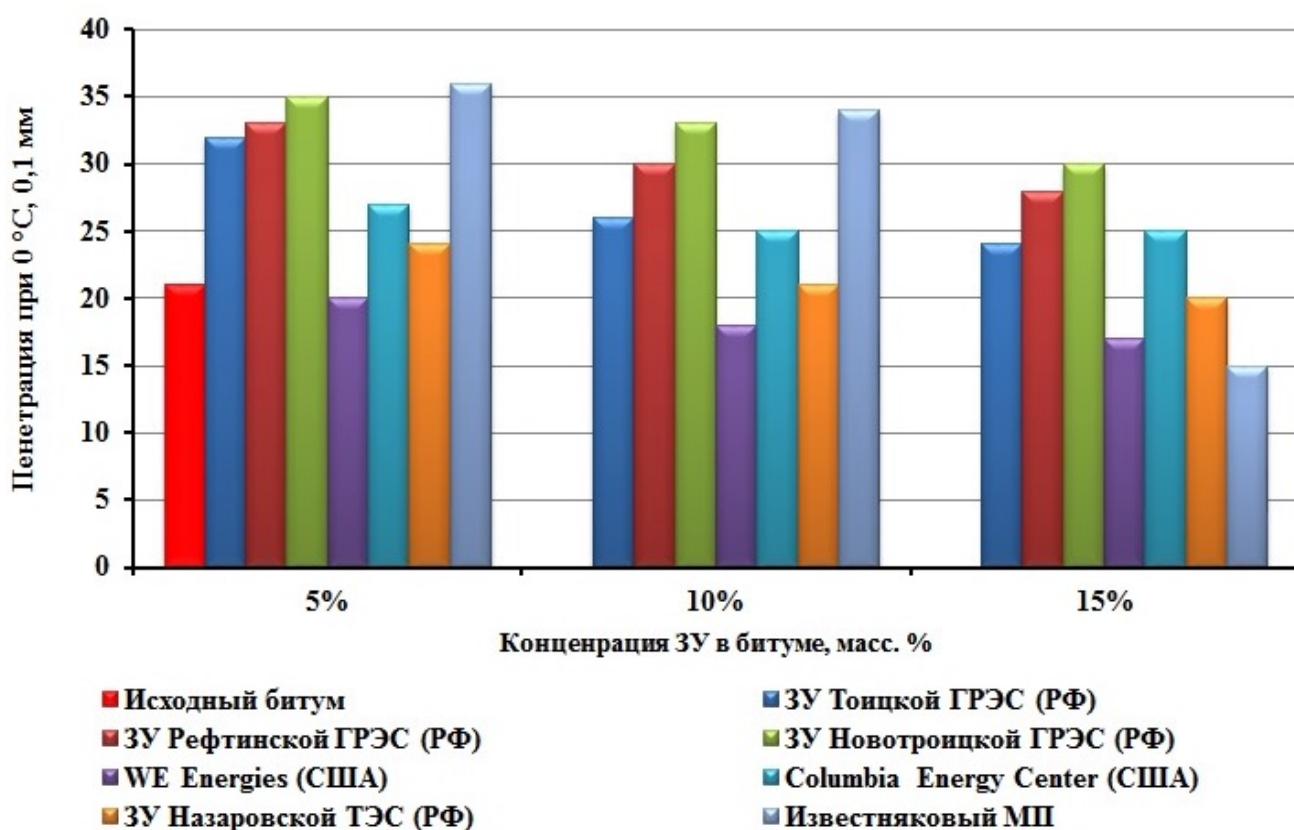


Рисунок 4.2 – Глубина проникания иглы в битум (пенетрация) при температуре 0 °С

Исключением является низкокальциевая зола WE Energies (США), использование ее в качестве добавки к битуму в количестве 5 % снижает значение пенетрации на 5 % и вяжущее соответствует марке исходного битума 60/90.

Что же касается высококальциевых зол-уноса, то использование их в качестве добавок, модифицирующих битум в количестве 5 % приводит к незначительному повышению пенетрации. В случае с золой-уноса Columbia Energy Center

(США) значение пенетрации увеличивается на 29 %, а у битума с ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) на 14 %, при этом вяжущее соответствует марке 60/90.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в сравнении с известняковым минеральным порошком высококальциевые золы-уноса оказывают меньший эффект от использования их в количестве 5 %, а использование низкокальциевых зол в этом же количестве оказывает значительный эффект на пенетрацию, и значения глубины проникания иглы стремятся к значению пенетрации вяжущего с содержанием 5 % известняка.

При повышении концентрации зол-уноса в битуме до 10 % значения пенетрации при температуре 0 °С несколько снижаются в сравнении с 5 %-ой их концентрацией, но повышаются в сравнении с исходным битумом, однако существуют некоторые исключения. Использование 10 % ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) приводит к повышению значения глубины проникания иглы на 24 % в сравнении с исходным битумом, что на 38 % ниже в сравнении с битумом, структурированным 10 % известнякового минерального порошка и на 28 % ниже в сравнении с использованием этой же золы в количестве 5 %. Так в соответствии со значениями пенетрации битум с 10 % ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) соответствует марке 60/90. Зола-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ) повышает пенетрацию на 43 % в сравнении с исходным битумом, это на 19 % ниже в сравнении с известняковым минеральным порошком и с ЗУ Троицкой ГРЭС. В данном случае значения пенетрации соответствуют марке 90/130.

Среди низкокальциевых зол выделяется ЗУ Новотроицкой ТЭС при использовании ее в количестве 10 % значение глубины проникания иглы возрастает на 57 % в сравнении с исходным битумом, однако это на 5 % в сравнении с битумом, имеющим в своем составе 10 % известняка. Использование низкокальциевой золы-уноса WE Energies (США) приводит к снижению значения пенетрации на 14 % в сравнении с исходным битумом, что характеризует битум как более вязкий и значения пенетрации в данном случае соответствуют марке 40/60.

Использование высококальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) не оказывают существенного влияния на значения глу-

бины проникания иглы и вяжущее соответствует марке 60/90. Введение 10 % ЗУ Columbia Energy Center (США) повышает значение пенетрации на 19 % в сравнении с исходным битумом, что на 43 % ниже чем при введении известнякового минерального порошка. Применение ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) в том же количестве оставляют значения глубины проникания иглы неизменным в сравнении с исходным битумом.

Применение как низкокальциевых, так и высококальциевых зол-уноса в количестве 15 % оказывает наименьшее влияние на пенетрацию. Низкокальциевая зола-уноса Троицкой ГРЭС (РФ) повышает пенетрацию вяжущего лишь на 14 % в сравнении с исходным битумом, при этом значения глубины проникания иглы соответствуют марке исходного битума 60/90. При использовании ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) пенетрация увеличивается на 33 и 43 % соответственно, такие значения при 0 °С характерны для вяжущего марки 90/130. Следует обратить внимание на то, что использование зарубежного представителя ЗУ WE Energies (США) к снижению значения глубины проникания иглы на 19 % в сравнении с исходным битумом. Такие изменения, позволяют сделать вывод о том, что введение золы WE Energies (США) приводит к повышению вязкости при температуре 0 °С при этом значения пенетрации, как и в случае с концентрацией 10 %, характерны для марки вяжущего 40/60.

Анализ полученных значений глубины проникания иглы при температуре 0 °С с использованием 15 % высококальциевых зол позволяет сделать следующие выводы. В случае с ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) значение пенетрации снижается на 5 % в сравнении с исходным битумом, однако в сравнении с вяжущим наполненным известняком пенетрация на 14 % выше. В случае же с ЗУ Columbia Energy Center (США) при добавлении ее в битум значение пенетрации не изменяется. Стоит отметить, что в обоих случаях значения пенетрации соответствуют марке 60/90.

С точки зрения ранжирования зол по степени эффективности применения в качестве добавок, модифицирующих битум, сравнение значений пенетрации при нормируемых температурах (+25 °С и 0 °С) показало, что между ними отмечается

обратная зависимость: чем меньше зола влияет на повышение вязкости при +25 °С, тем больше она снижает вязкость при 0 °С. Так при температуре 0 °С наибольший эффект оказывают золы Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ). Такое явление наблюдается из-за большого содержания сферических частиц в составе зол-уноса, которые создают подшипниковый эффект, приводящий к снижению вязкости битума.

Следующей характеристикой, которая позволяет оценить пластичность вязкого битума является растяжимость (дуктильность). Растяжимость представляет собой способность вяжущего к текучести в определенных условиях и характеризуется расстоянием, на которое вяжущее можно вытянуть в нить без разрыва. В соответствии с ГОСТ 11505–75 [190] данную характеристику определяют на дуктилометре при скорости деформации образца битума в виде восьмерки 5 см/мин, температурах испытания +25 и 0 °С.

Растяжимость битумов при +25 °С имеет максимальное значение, отвечающее переходу от состояния ньютоновской жидкости к структурированной. Чем больше битум отклоняется от ньютоновского течения, тем меньше его растяжимость при +25 °С, но достаточно высока при 0 °С [54].

Анализ полученных данных по растяжимости битумов, модифицированных золами-уноса, при температуре +25 °С (рисунок 4.3) показывает, что низкокальциевые золы-уноса оказывают больший структурирующий эффект в отличие от высококальциевых.

Введение 5 % низкокальциевых зол-уноса в битум снижает растяжимость в среднем на 47 см в сравнении с исходным битумом, а в сравнении с известняковым минеральным порошком на 9 см. Наименьший эффект от использования при температуре испытания +25 °С и концентрации 5 % в составе вяжущего наблюдается у 3У Рефтинской ГРЭС (РФ). В данном случае растяжимость составляет 48 см, это на 43 см меньше в сравнении с исходным битумом и на 5 см меньше в сравнении с битумом, модифицированным известняком.

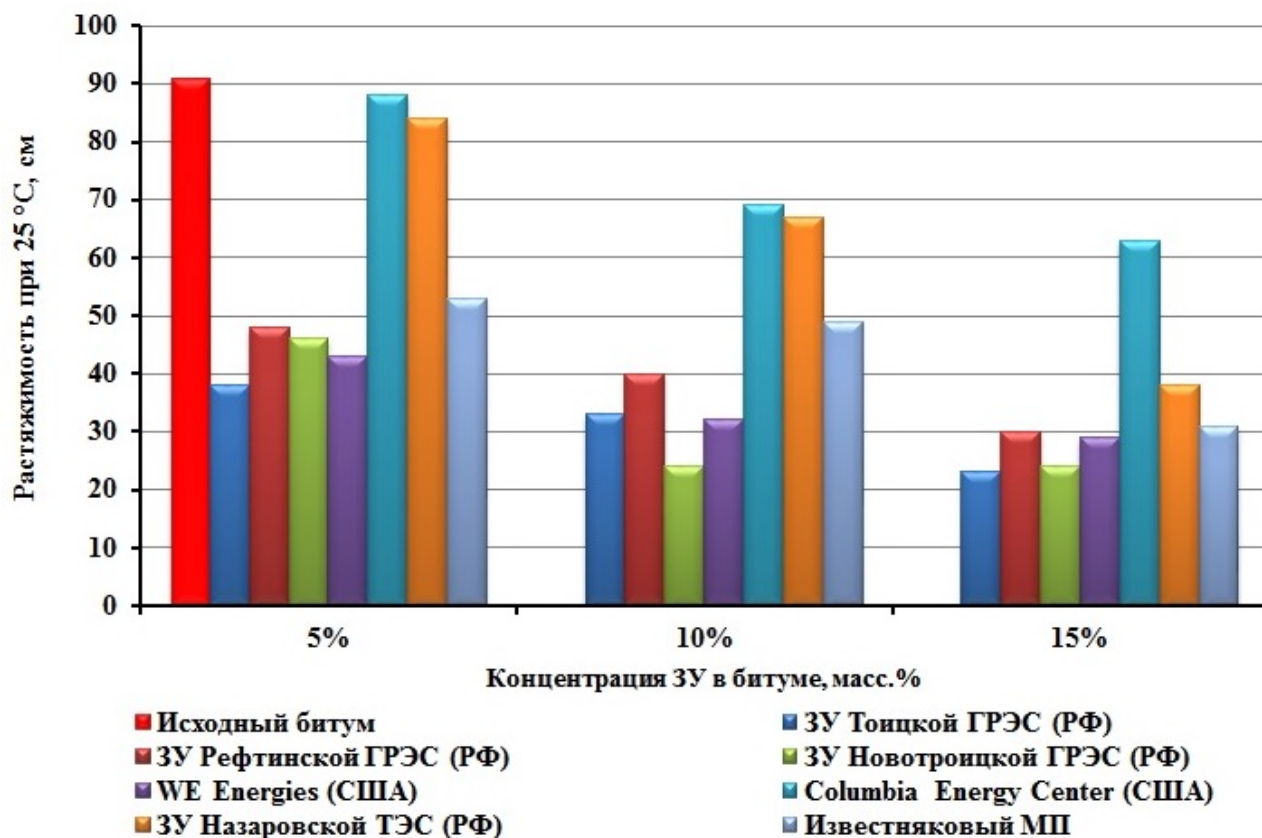


Рисунок 4.3 – Растяжимость битума при температуре +25 °С

Использование той же концентрации ЗУ Новотроицкой (РФ) при испытании в тех же условиях приводит к снижению растяжимости на 46 см в сравнении с исходным битумом и на 7 см в сравнении с известняковым минеральным порошком, но в сравнении с ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) растяжимость на 2 см ниже, а значит структурирующий эффект выше. В случае с ЗУ WE Energies (США) при тех же равных условиях растяжимость составила 43 см, это на 48 см меньше, чем у исходного битума и на 10 см, чем у битума с известняком. Наибольшим структурирующим эффектом отличается ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), растяжимость битума с ее использованием в количестве 5 % при температуре испытания +25 °С составила 38 см, что на 53 см меньше в сравнении с исходным битумом и на 15 см в сравнении с известняковым минеральным порошком.

Что же касается использования 5 % высококальциевых зол-уноса, то в случае с ЗУ Columbia Energy Center (США) растяжимость составила 88 см, а в случае с ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) – 84 см, что на 3 и 7 см соответственно ниже в срав-

нении исходным битумом и на 35 и 31 см соответственно ниже в сравнении с известняком.

Анализ полученных результатов по растяжимости битума показывает, что даже при использовании 5 % зол-уноса отмечается структурирующий эффект, однако при использовании низкокальциевых зол структурирующий эффект наиболее заметен, чем при использовании высококальциевых. Так наиболее эффективной является ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), а наименее эффективной – ЗУ Columbia Energy Center (США).

Повышение концентрации золы-уноса в составе вяжущего до 10 % приводит к дальнейшему снижению растяжимости при температуре испытания +25 °С. Наименьшим структурирующим эффектом среди низкокальциевых зол в данных условиях обладает ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ). Растяжимость вяжущего с ее использованием составляет 40 см, что на 51 см меньше в сравнении с исходным битумом и на 9 см – в сравнении с известняковым минеральным порошком. Использование ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) и ЗУ WE Energies (США) позволяет получить вяжущие с растяжимостью 33 и 32 см соответственно. Полученные значения на 58 и 59 см ниже, чем у исходного битума и на 16 и 17 см – чем у битума с известняком. При введении в битум ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) растяжимость составляет 24 см. Данное значение на 67 см ниже, чем у исходного битума и на 25 см – чем у вяжущего с известняком.

В отношении высококальциевых зол по показателю растяжимости так же отмечается меньшая структурирующая способность. Так у вяжущих с использованием 10 % ЗУ Columbia Energy Center (США) и ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) растяжимость при +25 °С составила 69 и 67 см соответственно, что на 22 и 24 см ниже в сравнении с исходным битумом и на 20 и 18 см выше в сравнении с вяжущим структурированным известняковым минеральным порошком.

Таким образом, можно отметить, что при концентрации зол в составе вяжущего в количестве 10 % наибольшим структурирующим эффектом обладает ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ), а наименьшим – ЗУ Columbia Energy Center (США).

Анализ полученных данных по растяжимости при температуре +25 °С с использованием 15 % зол-уноса показывает максимальный структурирующий эффект, что приводит к значительному снижению эластичности. При введении ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и ЗУ WE Energies (США) наблюдается наименьший структурирующий эффект. Растяжимость в этих случаях составляет 30 см, что на 61 и 62 см соответственно меньше в сравнении с исходным битумом и лишь на 1 и 2 см меньше в сравнении с вяжущим содержащим 15 % известнякового минерального порошка. При использовании ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) и ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) отмечается максимальный структурирующий эффект, при этом растяжимость составляет 23 и 24 см соответственно. Это на 68 и 67 см соответственно ниже, чем у исходного битума и на 8 и 7 см ниже, чем у вяжущего с использованием известняка.

При использовании 15 % высококальциевых зол-уноса в качестве структурирующих добавок к битуму и испытании модифицированного вяжущего при температуре +25 °С меньший эффект наблюдается в случае с ЗУ Columbia Energy Center (США), а наибольший – с ЗУ Назаровской ТЭС (РФ). У вяжущего с содержанием 15 % первой растяжимость составляет 63 см, данное значение на 28 см ниже в отличии от исходного битума и на 32 см выше в сравнении с вяжущим структурированным известняковым минеральным порошком. Введение в битум второй приводит к намного более значительному снижению растяжимости, на 53 см в сравнении с исходным битумом, однако на 7 см выше в сравнении с вяжущим содержащим 15 % известняка.

Таким образом, введение в вяжущее 15 % зол-уноса в качестве модифицирующей добавки приводит к значительному снижению эластичности в случае с низкокальциевыми представителями, а в случае высококальциевыми эффект от их использования менее заметен. Так наиболее эффективной является добавка в виде ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), а самой неэффективной – ЗУ Columbia Energy Center (США).

Анализ данных по растяжимости вяжущих, характеризующей эластичность, с содержанием добавок в виде зол-уноса в количестве 5, 10 и 15 % при температу-

ре испытания +25 °С показывает, что использование низкокальциевых представителей приводит к более значительным изменениям, чего нельзя сказать о высококальциевых. Следует обратить внимание на то, что использование ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) и ЗУ WE Energies (США) в количестве 5, 10 и 15 % оказывает наиболее значительный структурирующий эффект и значения растяжимости столь малы, что выходят за пределы нормы по ГОСТ 22245–90 даже для битума марки 40/60. Низкокальциевые золы-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) при введении их в количестве 5 % от массы битума, по данным о растяжимости при температуре +25 °С позволяют сделать вывод о том, что вяжущие переходят в марку 40/60, а при увеличении концентрации до 10 и 15 % приводят к снижению эластичности до значений не нормируемых стандартом. В случае же с высококальциевыми золами отмечается незначительное снижение растяжимости, так, например, при использовании ЗУ Columbia Energy Center (США) с любой концентрацией вяжущее соответствует марке исходного битума 60/90, а при использовании ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 5 и 10 % вяжущее соответствует марке 60/90, но при увеличении концентрации до 15 % растяжимость существенно снижается и вяжущее выходит за нормируемые пределы.

Оценка эластичности битума была проведена и при температуре 0 °С. Растяжимость исходного битума при 0 °С составляет 3,6 см, а битума, структурированного известняковым минеральным порошком в количестве 5, 10 и 15 % – 4, 3,7 и 3,4 см соответственно (рисунок 4.4, таблица 4.1).

Анализ полученных данных позволяет заключить что, как и в случае с испытанием золобитумных вяжущих с ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) и ЗУ WE Energies (США) при температуре +25 °С, испытания при 0 °С показывают, что данные добавки обладают наибольшим структурирующим эффектом.

Стоит отметить, что использование первой в количестве 5 % позволяет сохранить марку битума 60/90 и растяжимость составляет 3,5 см. Увеличение концентрации добавки приводит к снижению растяжимости до значений, не входящих в нормируемые пределы. Использование второй даже в количестве 5 %

оказывает такой структурирующий эффект, что значение растяжимости составляет 3,3 см и не попадает в нормируемые пределы.

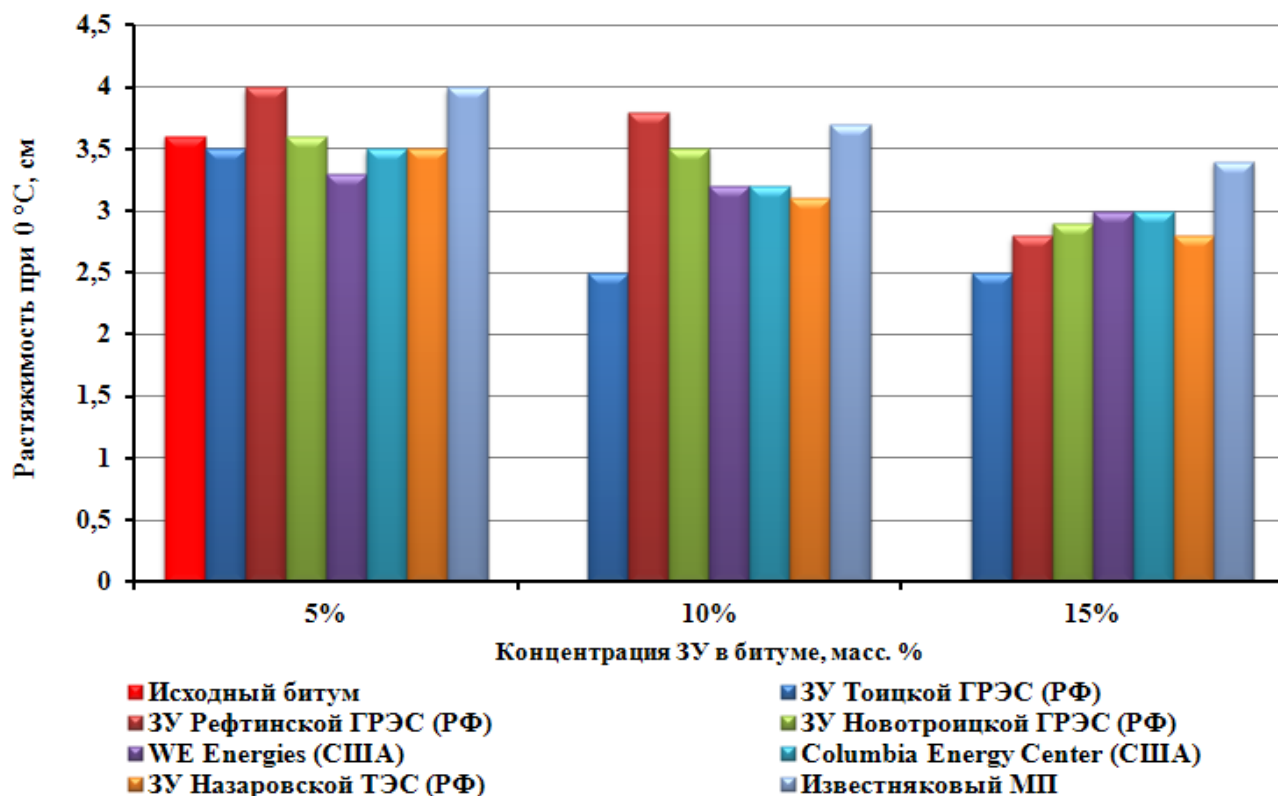


Рисунок 4.4 – Растяжимость битума при температуре 0 °С

Наряду с указанными золами, низкими значениями растяжимости обладают и высококальциевые представители ЗУ Columbia Energy Center (США) и ЗУ Назаровской ТЭС (РФ). Введение их в битум в количестве 5 % позволяет сохранить марку битума 60/90 и значения растяжимости составляют 3,5 см в обоих случаях, однако при повышении концентрации добавки до 10 и 15 % приводит к снижению значений растяжимости до пределов, когда невозможно охарактеризовать марку вяжущего.

Среди исследуемых в работе представителей можно выделить ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ). При введении их в битум в качестве модификаторов в количестве 5 % растяжимость составляет 4 и 3,6 см, а в количестве 10 % – 3,8 и 3,5 см соответственно, так растяжимость вяжущих остается в пределах нормы по ГОСТ. Повышение же концентрации этих зол до 15 % приводит к снижению растяжимости на 1 и 0,6 см соответственно, при этом значения

растяжимости составляют 2,8 и 2,9 см, что на 0,7 и 0,6 см ниже предельного нормируемого значения.

Таким образом, анализ динамики изменения значений растяжимости при температуре +25 и 0 °С с изменением концентрации зол-уноса в составе вяжущего от 5 до 15 % с шагом 5 % позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективными при температуре +25 °С показали себя высококальциевые золы-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) с наивысшей дисперсностью, а при температуре 0 °С обращают на себя внимание низкокальциевые золы-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ), дисперсность которых несколько ниже. Однако, стоит отметить, что наряду с дисперсностью, немаловажную роль играет строение частиц зол-уноса, так как присутствие угловатых, оскольчатых частиц могут спровоцировать ранний разрыв нити битума.

Не менее важной характеристикой является температура размягчения битума, которая позволяет установить предельную температуру, при которой битум переходит из твердого состояния в пластичное и приобретает подвижность. Анализ данных по изменению температуры размягчения (рисунок 4.5) после введения 3-х концентраций (5, 10 и 15%) зол-уноса различного состава позволяет сделать вывод о том, что практически все используемые повышают температуру размягчения на величину от 1 до 3 °С.

При введении всех видов зол в количестве 5% температура размягчения изменяется лишь на 1 °С в сравнении с исходным битумом и составляет 50 °С и совпадает со значением температуры размягчения при использовании 5 % известнякового минерального порошка.

Повышение концентрации ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) в составе вяжущего до 10 % не влечет за собой никаких изменений в сравнении с 5 %-ой их концентрацией. Использование же низкокальциевых зол-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ), WE Energies (США) и высококальциевой золы-уноса Columbia Energy Center (США) приводит к повышению температуры размягчения на 2 °С в сравнении с исходным битумом, ее вели-

чина составляет 51 °С и совпадает с температурой размягчения вяжущего, содержащего 10 % известняка.

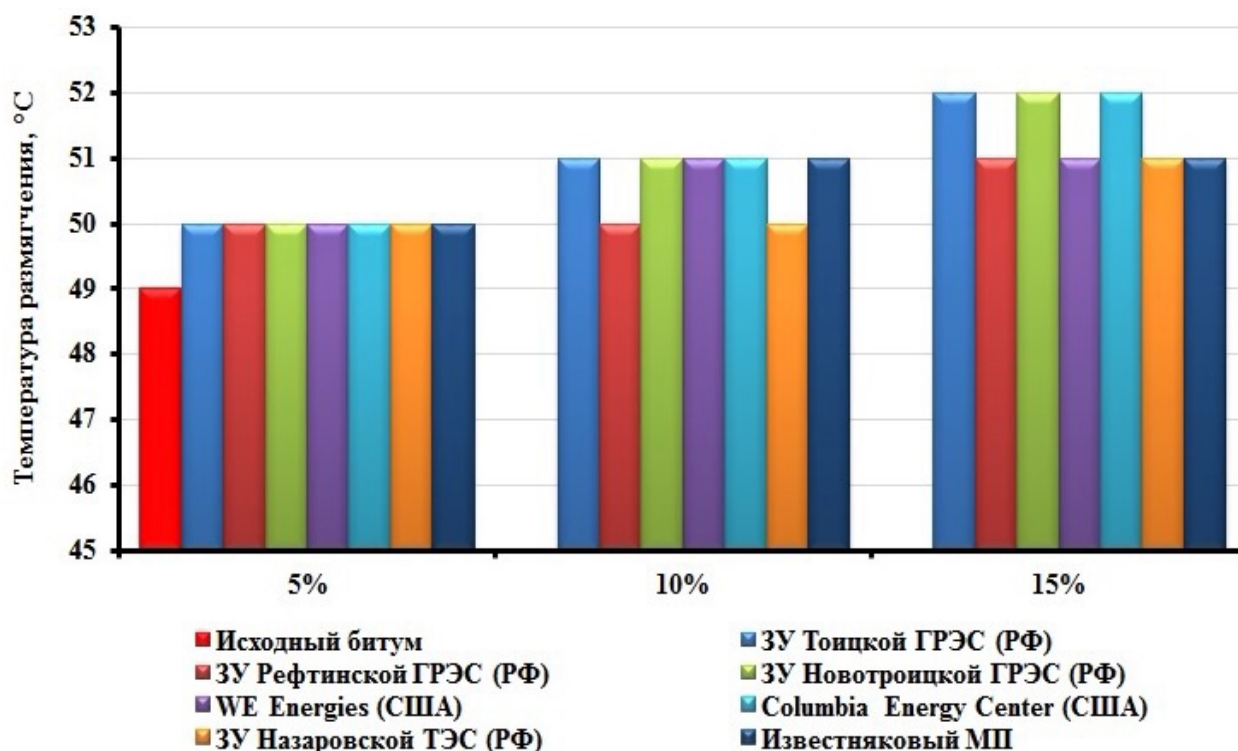


Рисунок 4.5 – Температура размягчения золобитумных вяжущих

Введение в вяжущее 15 % модифицирующего агента позволяет повысить температуру размягчения до 51 °С в случае с использованием ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ), WE Energies (США) и Назаровской ТЭС (РФ), что на 2 °С выше в сравнении с исходным битумом и совпадает с температурой размягчения вяжущего, содержащего 15 % известняка. В случае же с золами-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ) и Columbia Energy Center (США), введение их в битум в количестве 15 % приводит к повышению температуры размягчения до 52 °С. Данное значение на 3 °С в сравнении с исходным битумом и на 1 °С выше в сравнении с вяжущим модифицированным известняком той же концентрации.

Таким образом, анализ динамики изменения температуры размягчения показывает, что большее влияние оказывают низкокальциевые золы-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ) и высококальциевая зола Columbia Energy Center (США). Это может объясняться большим содержанием в составе низко-

кальциевых зол-уноса частиц неправильной формы (отличной от сферической) имеющих развитую морфологию поверхности, состоящих преимущественно из углерода, а также высоким содержанием активных центров на поверхности частиц зол, которые повышают структурирующую способность модификатора. Влияние же высококальциевой золы обусловлено совокупностью высокого содержания оксида кальция в составе золы и наличия значительного количества активных центров.

Такая характеристика как температура хрупкости позволяет определить нижний температурный предел, при котором материал разрушается под действием кратковременно приложенной нагрузки при котором допускается применение данного вида вяжущее. В соответствии со стандартной методикой температура хрупкости битума определяется на приборе Фрааса со скоростью охлаждения образца 1 °С/мин и, начиная с 0 °С прикладывается сгибающая нагрузка с равномерной скоростью. Принято считать, что чем ниже температура хрупкости, тем выше качество применяемого вяжущего.

Анализ полученных значений температуры хрупкости битума, модифицированного алюмосиликатными отходами топливно-энергетического комплекса в виде зол-уноса различных предприятий в концентрациях 5, 10 и 15 % (рисунок 4.6) показывает, что увеличение концентрации зол снижает температуру хрупкости. Однако, в зависимости от вида золы, применяемой в качестве модификатора, структурирующего битум, и количества ее в составе вяжущего значения температуры хрупкости разнятся.

Наиболее эффективной добавкой, позволяющей максимально снизить температуру хрупкости при использовании ее в количестве 5 % является низкокальциевая ЗУ WE Energies (США). Температура хрупкости золобитумного вяжущего с использованием данного представителя составила –19 °С, это на 3 °С больше в сравнении с исходным битумом и на 4 °С в сравнении с битумом, структурированным известняковым минеральным порошком.

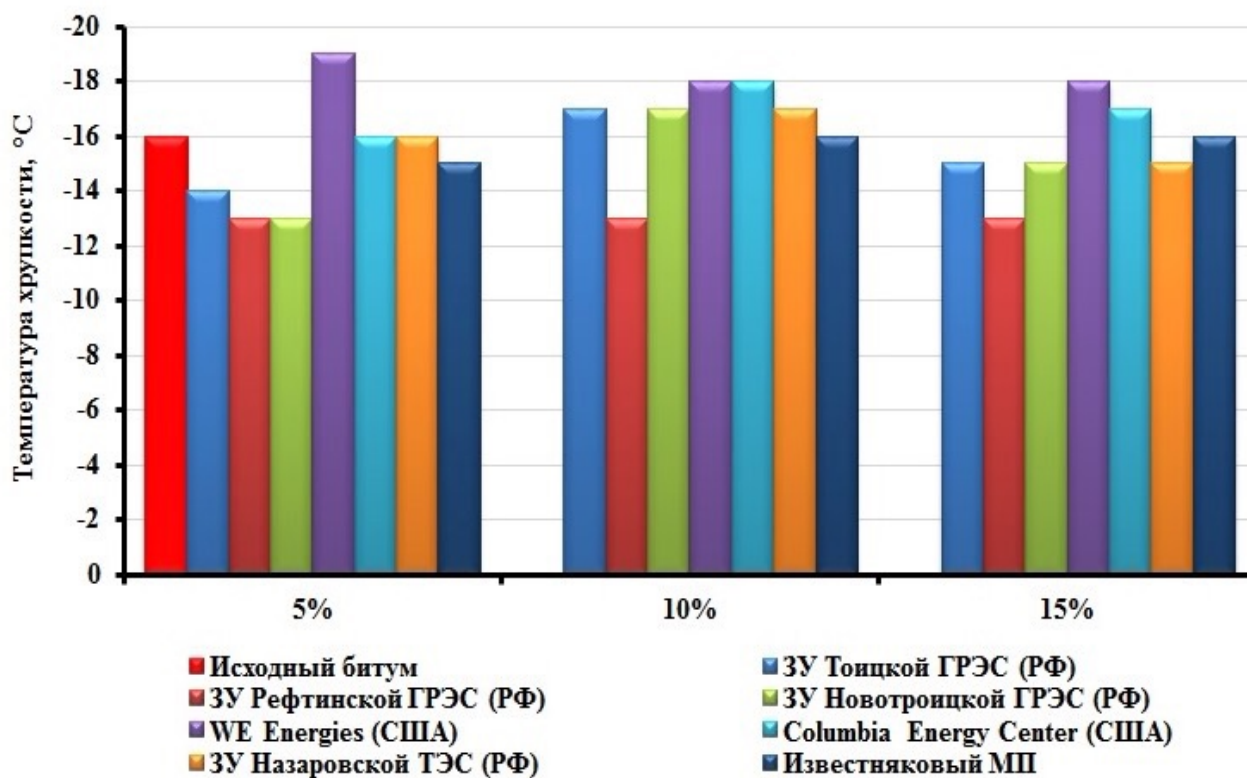


Рисунок 4.6 – Температура хрупкости золобитумных вяжущих

Использование высококальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 5 % не влияет на температуру хрупкости вяжущего, оставляя ее неизменной в сравнении с исходным битумом (-16°C). Введение в вяжущее 5 % низкокальциевых золы-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) приводит к некоторому повышению температуры хрупкости – на 2, 3 и 3 $^{\circ}\text{C}$ соответственно в сравнении с исходным битумом и на 1, 2 и 2 $^{\circ}\text{C}$ в сравнении с вяжущим модифицированным ИМП. При этом значения температуры хрупкости составили -14 , -13 и -13°C соответственно.

Повышение концентрации добавок в виде зол-уноса различного состава до 10 % привело к следующим результатам. В случае с низкокальциевой ЗУ WE Energies (США) и высококальциевой ЗУ Columbia Energy Center (США) температура хрупкости золобитумных вяжущих имеет наиболее низкие значения (-18°C в обоих случаях). Данные значения на 2 $^{\circ}\text{C}$ ниже в отличие от исходного битума и на 3 $^{\circ}\text{C}$ – в отличие от вяжущего с 10 % ИМП. Менее эффективными себя показав-

ли золы-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ) и Назаровской ТЭС (РФ). Температура хрупкости золобитумных вяжущих с их использованием в количестве 10 % составляет -17°C во всех трех случаях, это на 1°C ниже чем у исходного битума и на 2°C чем у вяжущего с 10 % известнякового минерального порошка. Наиболее неэффективной добавкой, с точки зрения снижения температуры хрупкости, показала себя зола-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ). Температура хрупкости золобитумного вяжущего с ее использованием составили -13°C , несмотря на то, что данное значение не выше нормы по ГОСТ 22245, но это на 3°C выше температуры хрупкости исходного битума и на 2°C выше – битума с известняком.

Использование зол-уноса в количестве 15 % от массы битума приводит либо к повышению температуры хрупкости, либо оставляет ее неизменной в сравнении с 10 % концентрацией. При использовании зол-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ) и WE Energies (США) температура хрупкости остается неизменной в сравнении с 10 % их концентрацией (-13 и -18°C соответственно). При этом использование золы-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ) остается наименее эффективным, а золы-уноса WE Energies (США) наиболее эффективным. В случае с высококальциевой ЗУ Columbia Energy Center (США) температура хрупкости составила -17°C , несмотря на то, что это на 1°C ниже в сравнении с исходным битумом и битумом с ИМП, это на 1°C выше в сравнении с 10 % концентрацией этой же золы. В случае же с золами-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ) и Назаровской ТЭС (РФ) температура хрупкости золобитумных вяжущих составила -15°C , данное значение на 2°C выше в сравнении с 10 % концентрацией этих зол и на 1°C выше в сравнении с исходным битумом и битумом с известняковым минеральным порошком.

Проведенный анализ динамики изменения температуры хрупкости вяжущих с использованием зол-уноса различного состава при разных концентрациях (5, 10 и 15 %) показал, что модификация битума алюмосиликатным техногенным сырьем из отходов топливно-энергетических предприятий приводит к снижению температуры хрупкости. При этом наиболее эффективными показали себя низкокаль-

циевые золы-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ) и высококальциевые золы-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 10 % от массы битума. Низкокальциевой же золы-уноса WE Energies (США) достаточно лишь 5 % для того, чтобы максимально снизить температуру хрупкости. Определяющими факторами, как и в предыдущих испытаниях, является размерность частиц и морфология поверхности.

Еще одной важной характеристикой битумных вяжущих, нормируемой ГОСТом, которая позволяет определить реологический тип битума является индекс пенетрации. Значения индекса пенетрации получают на основе результатов испытаний двух характеристик – глубины проникания иглы и температуры размягчения. Битумы различают по типу, когда интервал между их температурой размягчения и температурой, соответствующей определенной глубине проникания, различен. По жесткости битумы различают, когда при одинаковом типе значения температуры размягчения битумов разные [54].

С помощью индекса пенетрации в виде отвлеченного числа, выражающего выше упомянутый температурный интервал, можно охарактеризовать реологический тип вяжущего. В соответствии с ГОСТ 22245 [52], применяемые в дорожном строительстве битумы характеризуются индексом пенетрации от $-1,5$ до $+1,0$, т.к. они являются менее чувствительными к изменениям температуры, обладают характерными вязкоупругими свойствами, менее хрупки. Для битума марки БНД 60/90 традиционно применяемого для производства битумоминеральных композиций в III дорожно-климатической зоне индекс пенетрации колеблется в пределах от $-1,0$ до $+1,0$.

Рассчитанные значения индекса пенетрации (рисунок 4.7) позволяют говорить о том, что значительное влияние на них оказывает вид применяемой золы и ее количество в составе вяжущего. Однако стоит отметить, что при использовании низкокальциевых зол-уноса индекс пенетрации находится в пределах нормы по ГОСТ за исключением ЗУ WE Energies (США) – индекс пенетрации вяжущего, при ее использовании меньше нижнего предела ($-1,0$), что характерно и для высококальциевых зол.

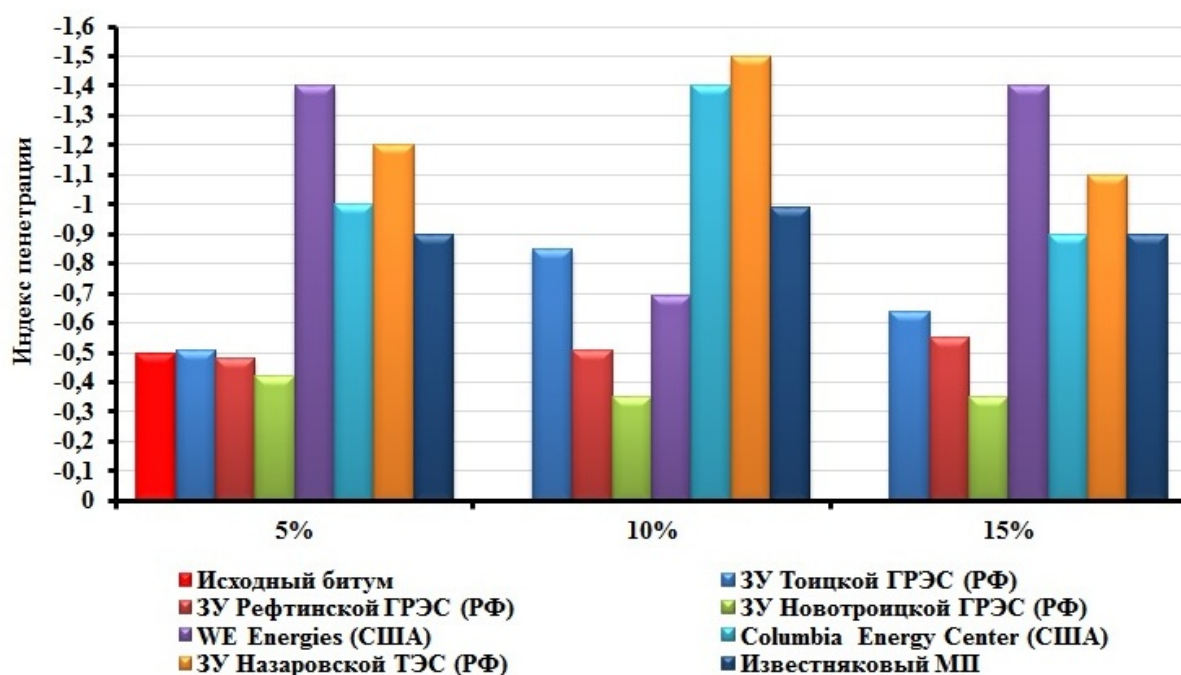


Рисунок 4.7 – Изменение индекса пенетрации

в зависимости от концентрации и вида золы-уноса в составе вяжущего

Так при использовании 5 % зол-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) значения индекса пенетрации составили $-0,51$, $-0,48$ и $-0,42$ соответственно. При этом значение индекса пенетрации вяжущего с использованием ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) лишь на $0,01$ ниже индекса пенетрации исходного битума.

Что же касается двух других низкокальциевых зол-уноса, то значения индекса пенетрации с их использованием на $0,02$ и на $0,08$ выше в сравнении с исходным битумом. В случае же использования высоко-кальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США), Назаровской ТЭС (РФ) и низкокальциевой золы WE Energies (США) при использовании в количестве 5 % индекс пенетрации составил $-1,0$, $-1,2$ и $-1,4$ соответственно. Значение индекса пенетрации вяжущего с использованием 5 % ЗУ Columbia Energy Center (США) достигает нижнего предела нормы, на $0,5$ ниже в сравнении с исходным битумом и лишь на $0,01$ ниже значения вяжущего с использованием ИМП. Использование высококальциевой ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) и низкокальциевой ЗУ WE Energies (США) приводит к

снижению индекса пенетрации на 0,7 и 0,9 в сравнении с исходным битумом и на 0,3 и 0,5 в сравнении с вяжущим структурированным известняком. При этом индекс пенетрации превышает нижний предел, и можно предположить, что полученные вяжущие будут более хрупкими.

Введение низкокальциевых зол-уноса Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) в количестве 10 % приводит к снижению индекса пенетрации в первых двух случаях на 0,34 и 0,03 и в третьем случае к повышению на 0,07 в сравнении с 5 % концентрацией. При этом индекс пенетрации остается в пределах нормы, когда вяжущее обладает устойчивостью к изменениям температуры, но индекс пенетрации в случае с золой-уноса Троицкой ГРЭС (РФ) стремится к нижнему пределу. Использование низкокальциевой золы WE Energies (США) в количестве 10 % значительно повышает индекс пенетрации на 0,71 в сравнении с 5 % концентрацией (–1,4) и составляет –0,69. В случае использования высококальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) индекс пенетрации снижается на 0,3 в обоих случаях в сравнении с 5 % их использованием, при этом значения составляют –1,4 и –1,5 соответственно. В этом случае значения индекса пенетрации выходят за пределы нормы и характеризуют вяжущее как более хрупкое.

Использование низкокальциевых зол Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) в количестве 15 % от массы вяжущего повышает индекс пенетрации на 0,21 в первом случае, снижает его на 0,04 во втором и оставляет неизменным в третьем случае в сравнении с 10 % концентрацией. В случае с низкокальциевой золой-уноса WE Energies (США) индекс пенетрации приобретает значение равное –1,4, как и в случае использования ее в количестве 5 %. Использование высококальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 15 % повышает индекс пенетрации на 0,5 и 0,4, при этом значения индекса пенетрации составляют –0,9 и –1,1, что на 0,1 выше в сравнении с 5 % их концентрацией.

Таким образом, анализ изменения индекса пенетрации показывает, что в случае с использованием низкокальциевых зол-уноса Троицкой ГРЭС (РФ),

Рефтинской ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) в количестве 5, 10 и 15 % изменения не значительны и индекс пенетрации остается в пределах нормы. Для низкокальциевой золы-уноса WE Energies (США) и высококальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) характерны значительные изменения индекса пенетрации вяжущи. При этом лишь использование золы WE Energies (США) в количестве 10 % и зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 15 % стремятся к пределам нормы.

Следующим немаловажным показателем, который позволяет охарактеризовать качество битума является интервал пластичности вяжущего (рисунок 4.8). Вяжущие, имеющие широкий интервал пластичности обладают высокой деформационной способностью, стойкостью к образованию трещин при низких температурах и устойчивостью против сдвига при повышенных температурах (50 °С) [56, 57, 73].

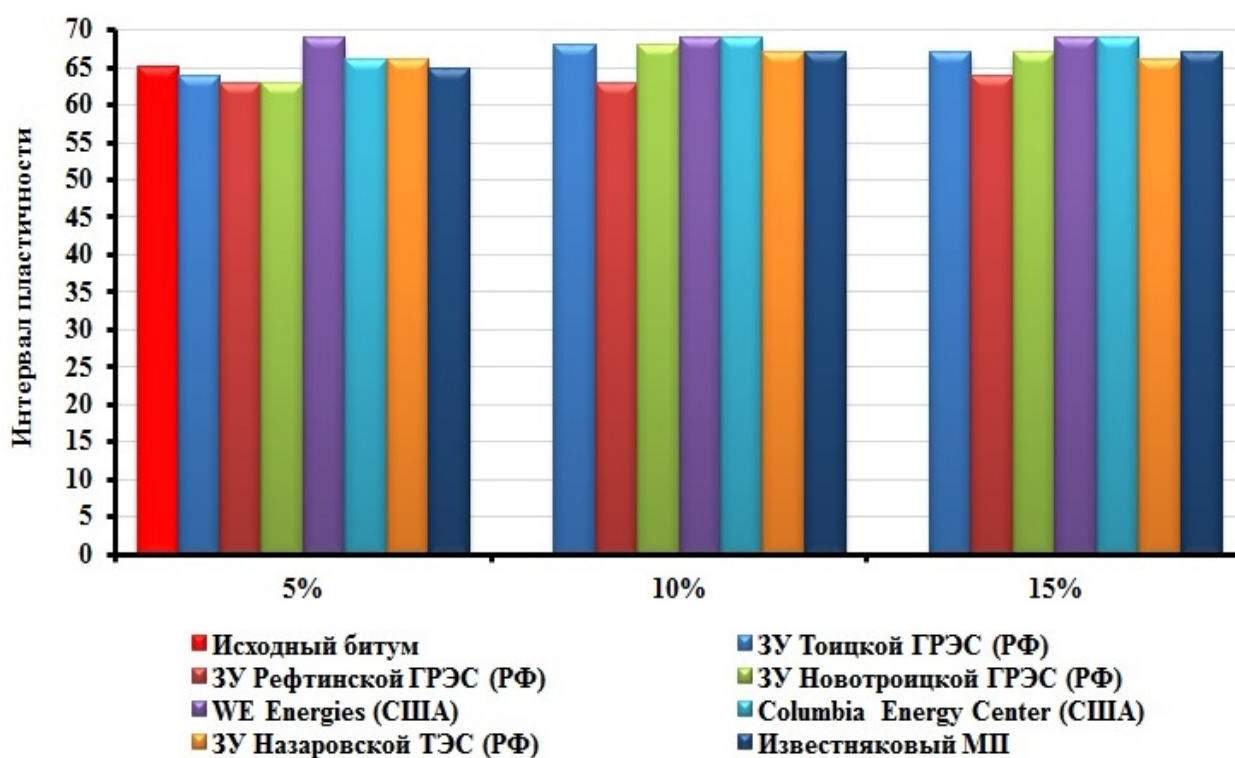


Рисунок 4.8 – Изменение интервала пластичности

в зависимости от концентрации и вида золы-уноса в составе вяжущего

По полученным значениям интервала пластичности (рисунок 4.8) можно выделить низкокальциевую ЗУ WE Energies (США). Использование в количестве 5 % имеет максимальное значение, не изменяется при увеличении количества золы в составе вяжущего до 10 и 15 % и интервал пластичности составляет 69 °С, что на 4°С выше в сравнении с исходным битумом и вяжущим с 5 % ИМП в составе и на 2 °С выше в сравнении с вяжущим структурированным 10 и 15 % известнякового минерального порошка. Наряду с золой-уноса WE Energies (США) высоким интервалом пластичности обладает вяжущее с использованием золы-уноса Columbia Energy Center (США), но максимального значения интервал пластичности достигает при использовании ее в количестве 10% в качестве структурирующей добавки. Как и в случае с предыдущим представителем интервал пластичности составляет 69 °С и при увеличении концентрации золы в составе вяжущего до 15 % не меняет своего значения. Использование же низкокальциевых зол-уноса Троицкой ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ) позволяет повысить интервал пластичности до 68 °С, при этом концентрация зол в составе вяжущего составляет 10 %. Следует отметить, что повышение их количества в составе вяжущего до 15 % приводит к снижению интервала пластичности на 1 °С. В случае с высококальциевой золой-уноса Назаровской ТЭС (РФ) максимального значения интервала пластичности можно достичь, используя ее в количестве 10 %, при этом интервал пластичности составляет 67 °С. Увеличение концентрации до 15 % приводит к уменьшению интервала пластичности. Неэффективной с точки зрения увеличения интервала пластичности показала себя зола-уноса Рефтинской ГРЭС (РФ). При использовании ее в количестве 5, 10 и 15 % значения интервала пластичности составили 63, 63 и 64 °С соответственно, что на 2, 2 и 1 °С меньше в сравнении с исходным битумом и на 2, 4, и 3°С меньше в сравнении с вяжущим структурированным 5, 10 и 15 % известнякового минерального порошка.

Анализ комплекса структурно-механических характеристик, определенных в соответствии с нормативными документами позволяет сделать вывод о том, что использование как низкокальциевых, так и высококальциевых зол-уноса позволяет улучшать и отдельные параметры вяжущего и качество вяжущего в целом. При

этом состав золы, морфоструктурные особенности и кислотно-основные свойства являются определяющими факторами, позволяющими в большей или меньшей степени структурировать битум. По совокупности полученных характеристик о структурированных вяжущих и степени влияния на них золы-уноса можно выстроить в следующем порядке по возрастанию: ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) → WE Energies (США) → ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) → ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) → Columbia Energy Center (США) → ЗУ Назаровской ТЭС (РФ).

4.2. Анализ реологических свойств битумов, модифицированных золами-уноса различного состава

Изучение свойств битума для дорожного строительства, структурированного алюмосиликатными отходами топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса различного состава является обязательным, но не всегда позволяет объективно оценить и спрогнозировать работу вяжущего в покрытии. В этой связи актуальным является использование современных методов, моделирующих условия эксплуатации вяжущего в покрытии.

Образование колеи является одной из важнейших проблем для покрытий автомобильных дорог, устроенных из битумоминеральных композиций. Битум, используемый для производства дорожно-строительных материалов, является типичным представителем вязкоупругих материалов, свойства которого зависят от температуры и времени действия нагрузок.

Понятие о вязкоупругом материале на примере битума появилось довольно давно, и, впервые ввел его великий физик Дж. К. Максвелл. Суть понятия заключается в следующем: при кратковременном приложении нагрузки битум ведет себя как упругое тело, а при длительном действии постоянной нагрузки – как вязкая жидкость. Деформации вязкоупругих материалов и характер течения жидкостей рассматривает наука «реология», находящаяся на стыке механики и физической химии. В реологии вязкоупругие свойства рассматриваются в зависимости от строения материала, что позволяет регулировать эти свойства. В случае с битума-

ми и асфальтобетонами термины «вязкоупругие свойства» или «реологические свойства» используют как взаимозаменяемые.

Таким образом, изучение реологических (или вязкоупругих) свойств битумов, определяемых экспериментально при различных температурах и скоростях нагружения (деформации), моделирующих условия эксплуатации покрытия автомобильной дороги в летний период, позволяет прогнозировать устойчивость асфальтобетонного покрытия к образованию колеи и способность асфальтобетона противостоять усталости под действием повторных нагрузок.

4.2.1. Методика определения реологических характеристик битумов

Реотехнологические свойства модифицированного битума определяли в соответствии со спецификацией TP538 SHRP [220] и AASHTO T315 [221] по методу Superpave в диапазоне температур от +46 до +76 °C с использованием вибрационного ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1 и измерительной системы пластина/пластина.

Эти исследования относятся к группе колебательных измерений, в которых задают напряжение сдвига в виде функции времени гармонических колебаний синусоидальной формы и измеряют получаемое в результате изменение деформации во времени (рисунок 4.9).

Важными измеряемыми величинами, которые необходимы для оценки вязкоупругих свойств, являются амплитуда напряжений сдвига τ и деформация γ , круговая частота $\bar{\omega}$, а также угол сдвига фаз δ между напряжением сдвига и деформацией. Для моделирования скорости движения транспорта около 80 км/ч следует использовать радианные частоты $\omega=1-100 \text{ с}^{-1}$ (в работе использовалась частота $\omega=10 \text{ с}^{-1}$ или рад/с).

По полученным кривым рассчитываются следующие параметры (рисунок 4.10):

– комплексный модуль, G^* (параметр колееобразования):

$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}; \quad (4.1)$$

– модуль накопления – эластичная составляющая комплексного модуля, G' :

$$G' = G^* \times \cos \delta; \quad (4.2)$$

– модуль потерь – вязкостная составляющая комплексного модуля, G'' :

$$G'' = G^* \times \sin \delta; \quad (4.3)$$

– комплексная вязкость, η^* :

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega}; \quad (4.4)$$

– действительная часть вязкости («динамическая вязкость»), η' :

$$\eta' = \eta^* \times \sin \delta; \quad (4.5)$$

– мнимая часть вязкости («сохраненная вязкость»), η'' :

$$\eta'' = \eta^* \times \cos \delta. \quad (4.6)$$

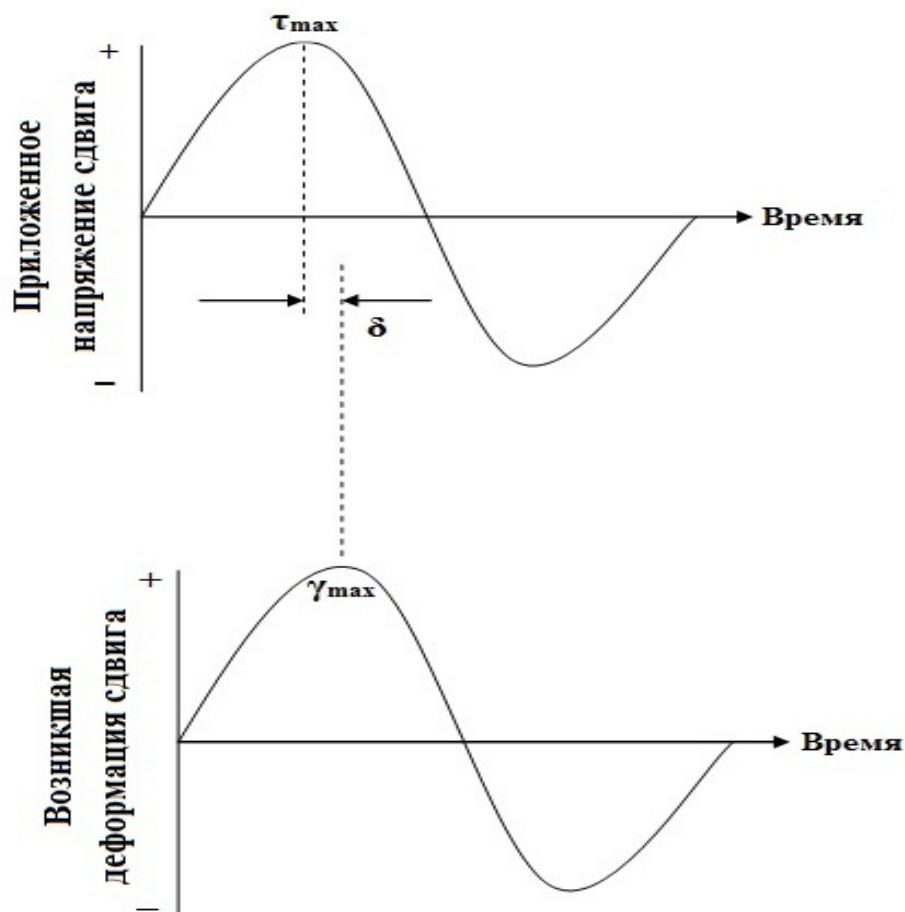


Рисунок 4.9 – Кривые приложенных напряжений сдвига и возникающих деформаций

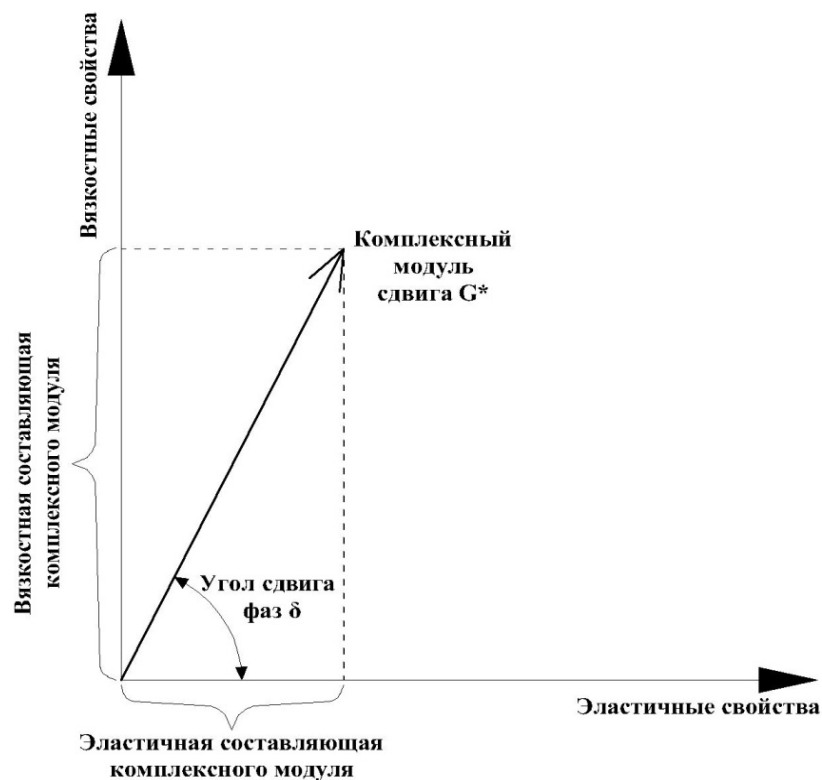


Рисунок 4.10 – Схема-интерпретация комплексного модуля сдвига

Чем больше угол сдвига фаз (δ), тем более вязким считается материал. Предельные значения, δ :

- чисто упругого материала: $\delta = 0^\circ$;
- чисто вязкого материала: $\delta = 90^\circ$.

Теория описанных колебательных измерений справедлива только в линейном вязкоупругом диапазоне, т.е. в диапазоне измерений, в котором модули не зависят от амплитуды. Линейный вязкоупругий диапазон ограничен очень малыми деформациями (5–10 %), это означает, что пробы битумов и мастик механически очень слабо нагружают, а измерения проводятся при их «структуре в состоянии покоя».

В данной работе измерения проводили при постоянных колебаниях. В ходе эксперимента задавали постоянную амплитуду и частоту и измеряли вязкоупругие свойства как функцию времени. Амплитуду выбирают таким образом, чтобы максимальный угол отклонения находился в пределах $0,01$ – 1° .

Подготовку и выполнение измерений с помощью измерительной системы пластина/пластина (PP) согласно AASHTO: (d – диаметр вращающейся пластины, g – зазор между пластинами) проводили следующим образом [222]:

1) Небольшое количество битумной смеси заливали в формы для получения цилиндрических таблеток из битума $\approx 1,5$ – $2,0$ мм толщиной и ≈ 36 мм в диаметре. Образец оставляли при комнатной температуре для остывания – не менее 15 минут. После этого его помещали на плоскую поверхность в емкость для хранения и накрывали крышкой для предотвращения окисления.

2) Нагревали измерительную систему вискозиметра до необходимой температуры (например, $T = +46$ °C).

3) Выполняли установку нулевого зазора для измерительной системы PP.

4) Раздвигали пластины и помещали образец на измерительную пластину (нижнюю).

5) Выдерживали образец при температуре измерения для стабилизации температуры в течение 10 минут.

6) Сближали пластины до расстояния $h = g + 50$ мкм. При использовании системы PP с $d = 36$ мм $g = 1$ мм (по стандарту пластина $d = 25$ мм). Размер волокон или частиц в битумной мастике не должен превышать 250 мкм. Если в образце содержатся частицы большего размера, величина зазора должна быть по меньшей мере в четыре раза больше максимального размера частиц.

7) Обрезали образец предварительно нагретым шпателем и убирали лишний материал битума или мастики.

8) Сближали пластины на расстояние g (для пластины с $d = 36$ мм $g = 1$ мм).

9) Выдерживали образец в течение не менее 10 минут для установления температурного равновесия между измерительной системой и образцом. При этом отображаемая температура измерения должна быть постоянной. Максимально допустимое отклонение $\Delta T = \pm 0,1$ K (°C) (рекомендуемое время 15 минут).

10) Образец дополнительно выдерживался в течение 5 минут для «отжига» образца – для ослабления поверхностного натяжения или для компенсации «сте-

рического затвердевания», которое может возникнуть в процессе хранения при комнатной температуре.

11) Для контроля и настройки предварительно установленной программы вискозиметра требуется время выдержки. Среди задаваемых параметров устанавливали не менее 10 циклов колебаний с радианной частотой $\omega=10$ рад/с (с^{-1}) с использованием соответствующей амплитуды. Для испытания CSD¹⁵ (с контролируемой деформацией сдвига) выбирали амплитуду деформации в интервале $\gamma=9\text{--}15\%$ (предпочтительно 12 %).

12) Время измерения составляло не менее 10 циклов колебаний при заданных значениях ω и амплитуды напряжений сдвига. Испытание колебание/время выполняли с угловой частотой $\omega=10$ с^{-1} , что соответствует частоте $f=1,59$ Гц.

В случае выполнения испытания CSS¹⁶ (с контролируемым напряжением сдвига) амплитуды напряжения сдвига должны находиться в диапазоне $\tau=90\text{--}150$ Па. Деформация γ не должна выходить за пределы диапазона линейных вязкоупругих свойств.

4.2.2. Реотехнологические свойства битума, модифицированного золами-уноса различного состава

Изучение реологических свойств битумов, модифицированных золами-уноса различных производств, проводили в научно-исследовательской лаборатории «Синтеза и исследований наносистем, ИК-спектроскопии» на кафедре «Материаловедение и технология материалов» БГТУ им В.Г. Шухова.

Для проведения испытаний были подготовлены образцы золобитумного вяжущего. Навески битума БНД 60/90 массой 0,5 кг разогревались до температуры 160 °С и смешивались с 0, 5, 10 и 15 % каждого из наполнителей (по массе). Все наполнители в виде зол-уноса различного состава от сжигания твердого топлива на отечественных и зарубежных предприятиях топливно-энергетической промышленности были смешаны с битумом с применением смесителя с низкой ско-

¹⁵ CSD – Controlled Shear Deformation в переводе с англ. – контролируемая деформация сдвига

¹⁶ CSS – Controlled Shear Stress в переводе с англ. – контролируемое напряжение сдвига

ростью (140 ± 5 об/мин) в течении 5 минут до получения однородной массы. После смешения были подготовлены образцы битума модифицированного золами-уноса диаметром 36 мм и высотой 1,5–2 мм. Затем, после остывания до комнатной температуры, образцы подвергались испытаниям.

В результате проведения испытаний были получены данные, с использованием которых построены диаграммы (рисунок 4.11–4.16) и проанализирован характер изменения кривых в зависимости от температуры испытания, вида и концентрации золы в составе вяжущего.

В общем виде кривые имеют следующий характер: с повышением температуры снижается способность вяжущего сопротивляться напряжению сдвига. Однако состав и свойства, используемых зол-уноса в качестве наполнителей, а также их концентрация в составе вяжущего оказывает влияние на величину параметра устойчивости покрытия к колееобразованию при разных температурах, который имеет тенденцию к повышению в сравнении с исходным битумом и некоторые различия в сравнении с вяжущим, наполненным известняковым минеральным порошком с идентичными концентрациями.

По результатам съемки образцов, были построены зависимости параметра устойчивости к колееобразованию от температуры битума (рисунок 4.11), модифицированного 5 %-ами низкокальциевых зол-уноса: Троицкой ГРЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ) и WE Energies (США).

Анализ полученных кривых позволяет отметить, что наполнитель в виде ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) оказывает незначительное влияние на характер кривой в сравнении с исходным битумом. При начальной температуре испытания $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ параметр устойчивости к колееобразованию повышается на 20 %, такая тенденция сохраняется до достижения температуры $58\text{ }^{\circ}\text{C}$, дальнейшее увеличение температуры приводит к переходу золобитумного вяжущего, как и исходного битума, в текучее состояние, в котором вяжущее теряет упругие свойства и не способно сопротивляться напряжениям сдвига.

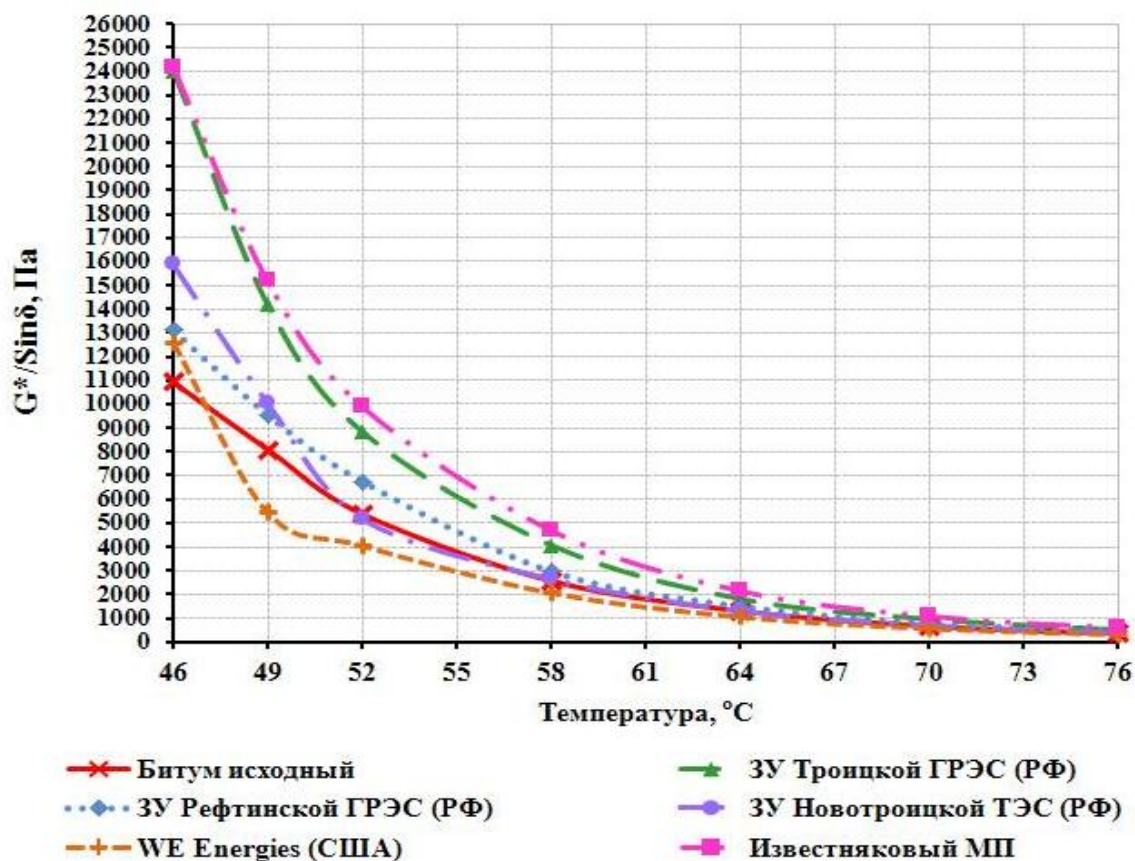


Рисунок 4.11 – Параметр устойчивости покрытия к колееобразованию с применением вяжущего модифицированного низкокальцевыми золами-уноса (5 % от массы битума)

Использование ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) в качестве структурирующей добавки в количестве 5 % от массы битума показало, что при температуре 46 °C значение параметра устойчивости к колееобразованию повышается на 45 % в сравнении с исходным битумом, что превышает этот же параметр вяжущего с использованием ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) на 25 %. Однако при температуре 52 °C исследуемый параметр резко снижается и с дальнейшим повышением температуры принимает значения близкие исходному битуму.

Значительно выделяется из числа низкокальцевых представителей ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ). Значение параметра устойчивости к колееобразованию на начальном этапе испытания на 120 % превышает значение исходного битума и имеет довольно близкие значения к вяжущему с использованием известнякового минерального порошка, имея лишь небольшие отклонения. Использование ЗУ

Троицкой ГРЭС (РФ) даже при такой небольшой концентрации позволяет добиться увеличения температуры перехода вяжущего в жидкое состояние, которая составляет 64 °С. Такое влияние данного представителя на вязкоупругие свойства битума объясняется значительным содержанием в составе золы частиц отличной от сферической формы, имеющих развитую поверхность и отличающихся большим содержанием углерода в своем составе, а также высокой пористостью – 43 %. Перечисленные факторы позволяют наиболее эффективно адсорбировать битум на поверхности материала и в большей степени структурировать его.

Что же касается зарубежного представителя 3У WE Energies (США), то ее использование в качестве структурирующей добавки к битуму с концентрацией 5 % от массы битума является нецелесообразным, т.к. увеличение параметра устойчивости к колееобразованию происходит лишь при температуре 46 °С почти на 15,5 %, но с увеличением температуры наблюдается резкое снижение параметра, затем кривая принимает вид близкий исходному битуму, при этом значения параметра устойчивости к колееобразованию несколько ниже чем у исходного битума.

С увеличением концентрации низкокальциевых отходов от сжигания твердого топлива до 10 % от массы битума (рисунок 4.12) происходят существенные изменения.

Так, параметр устойчивости к колееобразованию вяжущего с использованием 10 % 3У WE Energies (США) на начальном этапе испытания при температуре 46 °С на 37 % выше в сравнении с концентрацией добавки 5 %. Характер кривой в данном случае схож с кривой вяжущего с 3У Троицкой ГРЭС (РФ), имея некоторые отклонения при температуре 46 и 52 °С. При этом значения параметра устойчивости к колееобразованию битума с 3У Троицкой ГРЭС (РФ) несколько снизился (на 9 %). Характер кривой золобитумного вяжущего с 3У Рефтинской ГРЭС (РФ) схож с двумя предыдущими, но параметр устойчивости к колееобразованию имеет более низкие значения (на 16 %) по отношению к ним.

Вяжущее же с 3У Новотроицкой ТЭС (РФ) при температурах 46–58 °С имеет значения параметра устойчивости к колееобразованию близкие исходному битуму и превышает их лишь на 15 %.

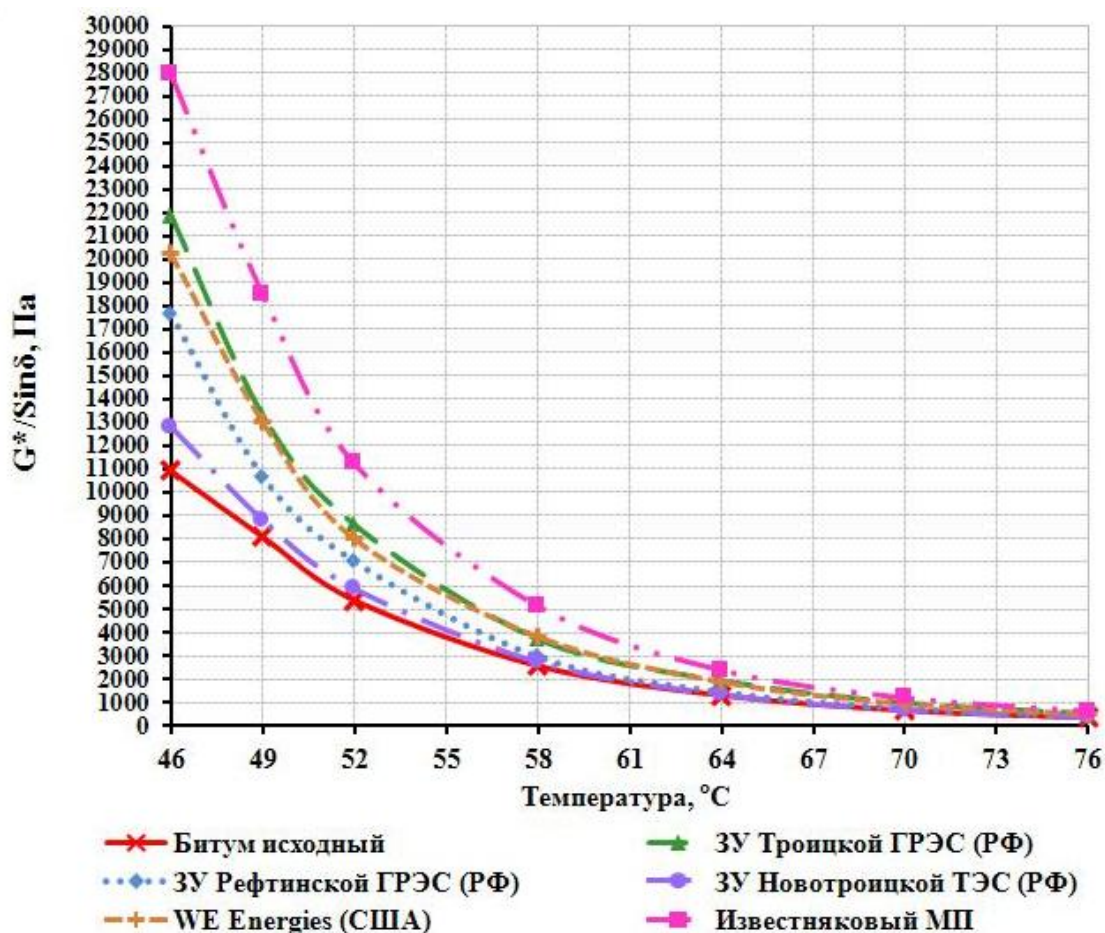


Рисунок 4.12 – Параметр устойчивости покрытия к колееобразованию с применением вяжущего модифицированного низкокальцевыми золами-уноса (10 % от массы битума)

Стоит так же отметить, что при температуре 64 °C ЗУ WE Energies (США) и ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) лучше сопротивляются напряжениям сдвига в сравнении с ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ), которые идентичны исходному битуму, но хуже в сравнении с известняком.

При концентрации низкокальцевых зол 15 % от массы битума происходят следующие изменения (рисунок 4.13). Отмечается значительный скачок параметра устойчивости к колееобразованию при температурах 46–58 °C у золобитумного вяжущего с использованием ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) и ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ), на 46 и 29 % соответственно в сравнении с 10 %-ой концентрацией. Это превышает значения вяжущего наполненного 15 %-ами известняка на 45 и 41 %

соответственно. При температуре 64 °С данные материалы показывают результаты в среднем на 55 % лучше, чем известняк.

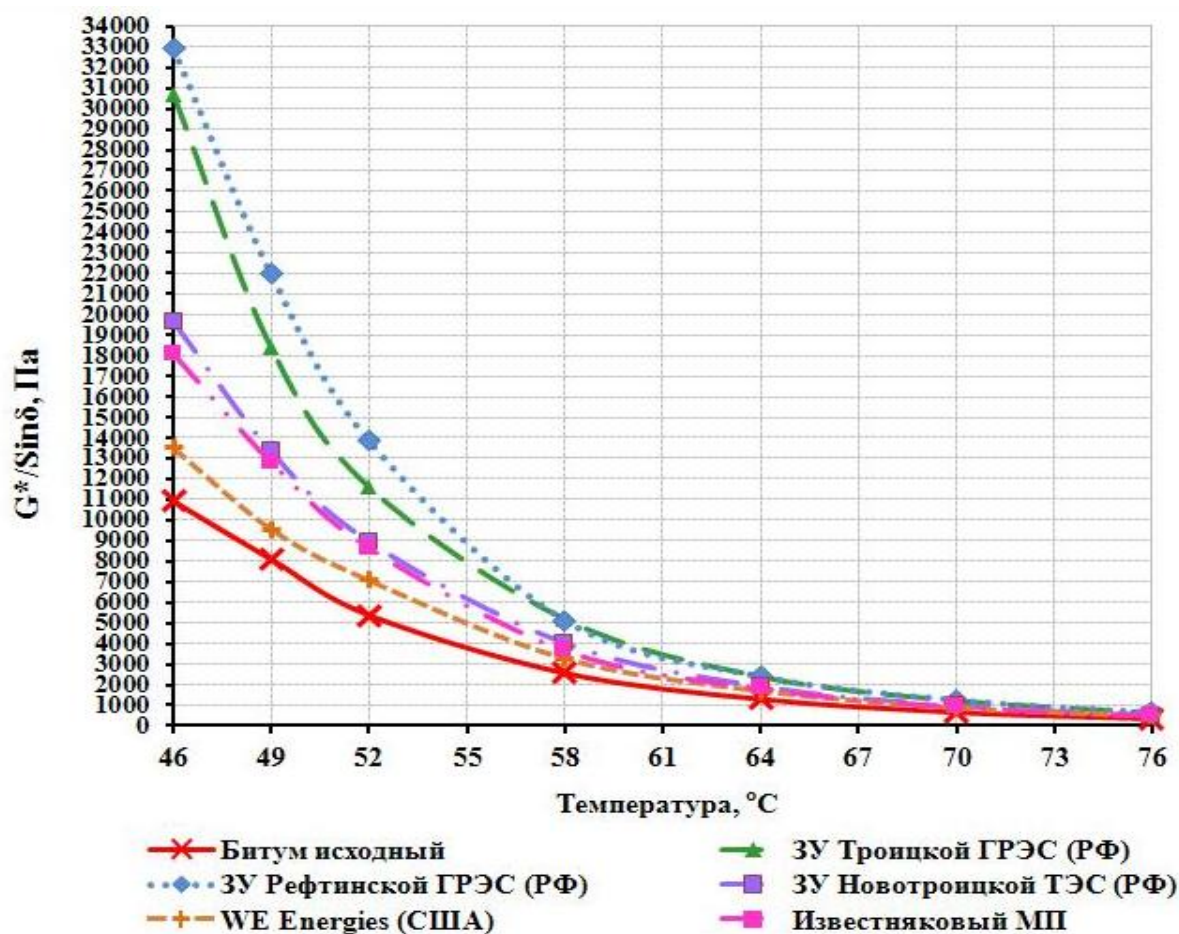


Рисунок 4.13 – Параметр устойчивости покрытия к колееобразованию с применением вяжущего модифицированного низкокальцевыми золами-уноса (15 % от массы битума)

Характер же кривой вяжущего с 3У Новотроицкой ТЭС (РФ) схож с кривой вяжущего наполненного известняком, и, параметр устойчивости к колееобразованию в данном случае незначительно выше на протяжении всего испытания.

Что же касается 3У зарубежного предприятия WE Energies (США), то ее использование в количестве 15 % от массы битума практически не меняет характер кривой в сравнении с 5 и 10 %-ой концентрацией. При этом характер кривой схож с кривой исходного битума, превышая его по значениям параметра устойчивости к колееобразованию на 41 %, что ниже в сравнении с известняком на 25 %.

Использование высококальциевых зол-уноса в качестве структурирующей добавки к битуму даже в небольших количествах позволяет добиться заметного результата в улучшении реологических свойств битума (рисунок 4.14).

ЗУ зарубежного предприятия Columbia Energy Center (США) оказывает наиболее значимый эффект, при концентрации 5 % от массы битума происходит резкий скачок параметра устойчивости к колееобразованию в сравнении с исходным битумом в диапазоне температур 46–64 °С (на 50 %). На данном отрезке кривая приобретает схожий характер в сравнении с битумом наполненным известняковым порошком и отличается от него лишь на 10 %. Достигая температуры испытания 64 °С, золобитумное вяжущее переходит в жидкое состояние и сопротивление напряжениям сдвига стремится к нулю.

Применение высококальциевой ЗУ отечественного предприятия Назаровской ТЭС (РФ) в количестве 5 % так же приводит к значительному увеличению параметра устойчивости к колееобразованию. При этом значения параметра при температурах 46–49 °С на 15 % ниже вяжущего с ЗУ Columbia Energy Center (США), а в диапазоне температур 52–76 °С эти кривые идентичны.

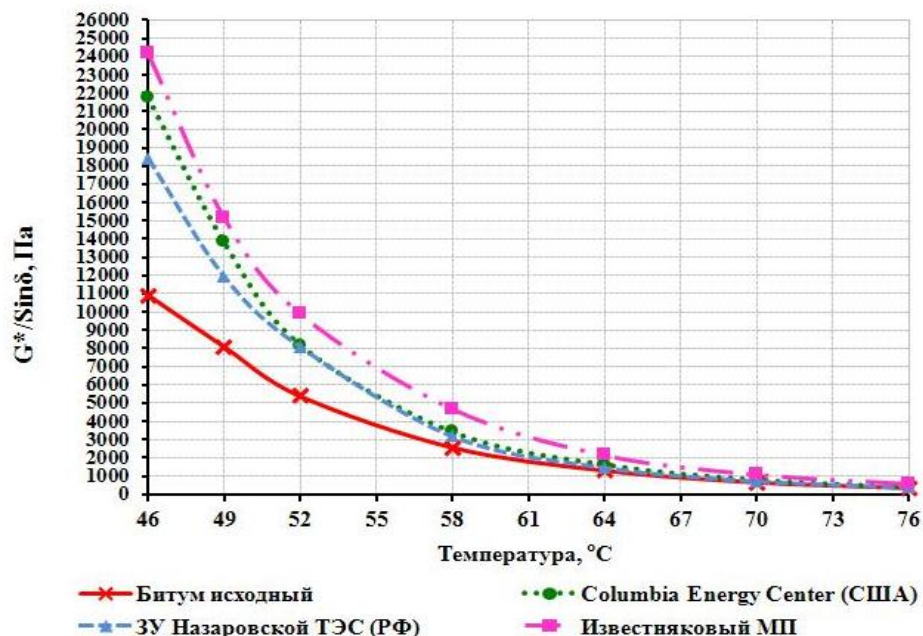


Рисунок 4.14 – Параметр устойчивости покрытия к колееобразованию с применением вяжущего модифицированного высококальциевыми золами-уноса (5 % от массы битума)

Такое влияние высококальциевых зол на реологические свойства вяжущего объясняется значительным содержанием оксида кальция в их составе, который способствует хемосорбционным процессам при взаимодействии с битумом.

Повышение концентрации высококальцевого техногенного сырья до 10 % (рисунок 4.15) несколько снижает вязкоупругие свойства золобитумного вяжущего при 46 °С.

В случае с ЗУ Columbia Energy Center (США) – на 13 %, с ЗУ Назаровской ТЭС (РФ) – на 2 %. Однако при температуре 64 °С параметр устойчивости к колеобразованию с использованием обеих зол повышается в среднем на 15 %.

При этом содержание известняка в количестве 10 % от массы битума увеличивает сдвигоустойчивость вяжущего, в сравнении с 5 %-ой концентрацией, на 13 % при начальной температуре испытания, а при температуре 64 °С на 10 %. Сравнивая битум с использованием низкокальциевых зол и известняком стоит отметить, что известняк показывает гораздо более высокие результаты в диапазоне температур 46–64 °С.

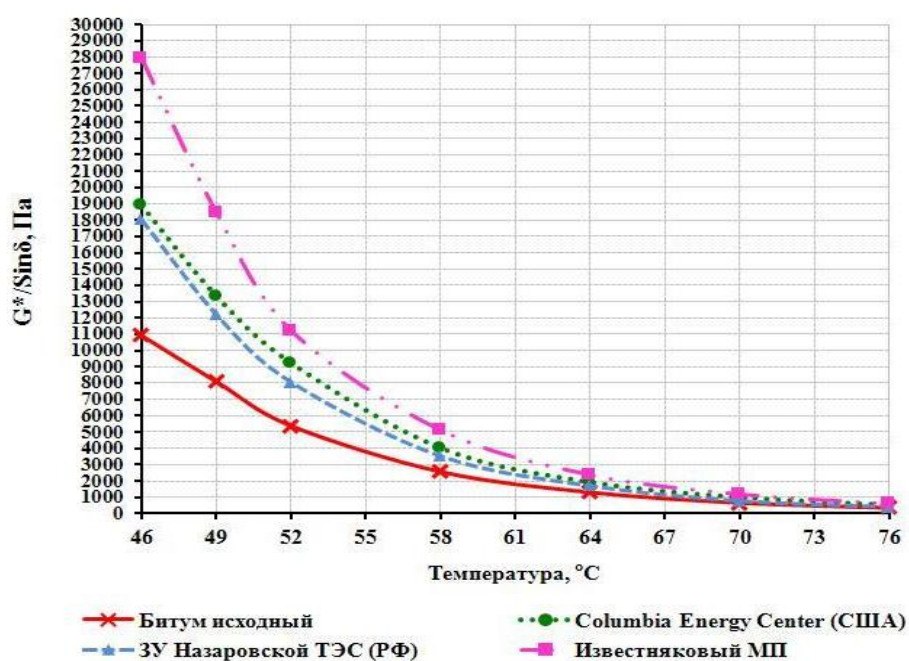


Рисунок 4.15 – Параметр устойчивости покрытия к колеобразованию с применением вяжущего модифицированного высококальциевыми золами-уноса (10 % от массы битума)

При 15 %-ой концентрации исследуемых наполнителей в виде высококальциевых зол-уноса в битуме (рисунок 4.16) происходит повышение сопротивления напряжениям сдвига при начальной температуре испытания, в то время как использование известняка с той же концентрацией приводит к значительному его снижению.

Важно отметить, что при температуре испытания 64 °С, когда битум переходит в жидкое состояние, снижение параметра устойчивости к колееобразованию на 15 % в сравнении с концентрацией 10% происходит как у зол, так и у известняка.

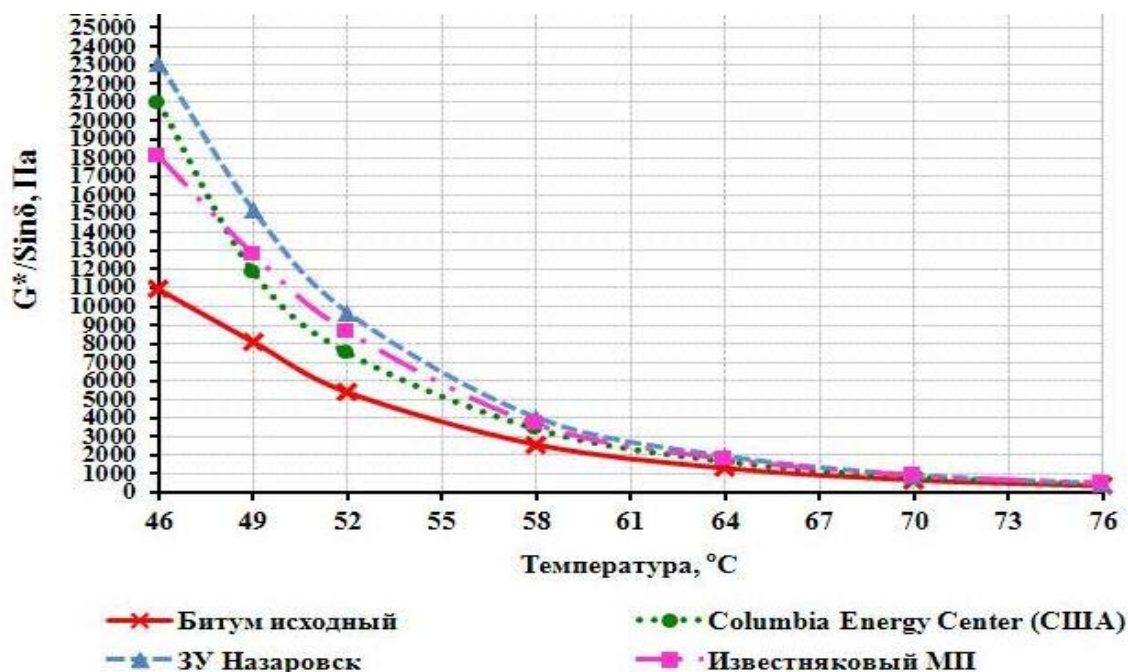


Рисунок 4.16 – Параметр устойчивости покрытия к колееобразованию с применением вяжущего модифицированного высококальциевыми золами-уноса (15 % от массы битума)

Таким образом, изучение реологических характеристик битума с использованием техногенного сырья из отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса различных производств с концентрацией их 5, 10 и 15 % от массы битума позволяет сделать вывод о том, что золы-уноса являются эффективными добавками, позволяющими увеличивая вязкость повысить устойчивость

вяжущего к деформациям при температурах, моделирующих условия работы покрытия в летний период [223]. При этом наибольший эффект от использования добавок наблюдается при содержании низкокальциевых зол-уноса в количестве 15 % от массы битума, а высококальциевых – 10 %. По степени повышения устойчивости золобитумного вяжущего к напряжениям сдвига исследуемые в работе материалы можно расположить в следующем порядке: WE Energies (США) → ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) → ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) → ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) → Columbia Energy Center (США) → ЗУ Назаровской ТЭС (РФ).

4.3. Составы и свойства асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих

Асфальтобетон на протяжении долгих лет остается наиболее распространенным материалом для устройства покрытий автомобильных дорог. При этом качество асфальтобетона определяется спецификой структурно-механических и реологических свойств используемого органического вяжущего. В связи с этим одной из важнейших задач на сегодняшний день является повышение качества дорожных композитов (сдвигоустойчивость, термостабильность), посредством модификации битумов. Это позволит обеспечить высокие эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог и увеличить срок их службы [224–227].

Для повышения качества применяемого битума используют различного рода синтезированные добавки, имеющие высокую стоимость, что приводит к удорожанию битума и битумоминеральных композиций, получаемых на его основе. При этом существует большое количество природного и техногенного сырья, обладающего огромным потенциалом свойств с точки зрения использования в битумоминеральных композициях и повышения их качества.

В настоящей работе показана возможность расширения номенклатуры модифицирующих добавок путем применения общедоступного техногенного алюмосиликатного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в ви-

де зол-уноса различного состава, позволяющих повысить качество вяжущего, и, как следствие, качество асфальтобетона на его основе.

С целью обоснования эффективности применения зол-уноса была взята широкая выборка топливных отходов, представляющая собой 6 видов зол, отличающихся видом сжигаемого топлива, а также технологиями его сжигания, удаления и хранения отходов. Среди исследуемых образцов четыре представителя низкокальциевых зол-уноса и два – высококальциевых, кроме того, среди них два представителя (один низкокальциевый, один высококальциевый) зарубежного производства.

Для апробации теоретических исследований с учетом свойств сырьевых материалов и оптимальных составов структурированного битума был произведен подбор составов плотного асфальтобетона типа Б с использованием в качестве связующего золобитумных вяжущих. Для получения асфальтобетонной смеси применялись щебень гранитный и песок из отсева дробления (гранитный) Шкурлатовского месторождения, известняковый минеральный порошок производства ООО «Стромис», а также золобитумное вяжущее на основе отходов топливно-энергетических предприятий различного состава.

Исходя из того, что используемые золы-уноса по содержанию СаО делят на 2 группы (высококальциевые и низкокальциевые) были изучены свойства полученных композитов на основе золобитумных вяжущих структурированных представителями отходов топливно-энергетических предприятий каждой из групп. Учитывая различное количество зол-уноса в составе вяжущего (15 % низкокальциевых и 10 % высококальциевых), были рассчитаны зерновые составы, в которых незначительно меняется содержание наполнителя (таблицы 4.2, 4.3, 4.4).

Таким образом, содержание минерального порошка в составе асфальтобетона с учетом наличия частиц низкокальциевых зол-уноса в составе смеси – 9,01 %, а с учетом высококальциевых – 9,31 %.

В дальнейшем по результатам испытаний пробных составов асфальтобетонных смесей с использованием различного количества золобитумных вяжущих бы-

ло определено оптимальное количество связующего в составе асфальтобетона, которое обеспечивает максимальную прочность асфальтобетона [24].

Таблица 4.2 – Рассев минеральной части плотного асфальтобетона типа Б

Наименование материалов	Содержание зерен мельче данного размера, (мм), в % по массе											
	40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	<0,071
Щебень (10–15)	100	100	58	17,4	11,4	8,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,0
Щебень (5–10)	100	100	100	94,6	9,6	1,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,0
Отсев	100	100	100	99,8	96,3	53,9	38,6	27,7	19,4	12,0	6,8	0,0
МП	100	100	100	100	100	100	100	100	99,8	98,2	72,8	0,0
Низко-кальциевые золы-уноса	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,6	76,3	0,0
Высоко-кальциевые золы-уноса	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	95	0,0

Таблица 4.3 – Зерновой состав минеральной части плотного асфальтобетона типа Б с учетом присутствия низкокальциевых зол-уноса в составе

Наименование материалов	Содержание, %	Содержание зерен мельче данного размера, (мм), в % по массе										
		40	20	15	10	5,00	2,50	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Щебень (10–15)	28,38	28,4	28,4	16,5	4,9	3,2	2,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Щебень (5–10)	14,52	14,5	14,5	14,5	13,7	1,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Отсев	47,19	47,2	47,2	47,2	47,1	45,5	25,4	18,2	13,1	9,2	5,7	3,2
МП	9,01	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,0	6,7
Зерновой состав		100,0	100,0	88,1	75,7	60,0	38,0	28,5	23,4	19,4	15,7	10,8
Требования ГОСТ	min	90	90	80	70	50	38	28	20	14	10	6
	max	100	100	100	100	60	48	37	28	22	16	12

Таблица 4.4 – Зерновой состав минеральной части плотного асфальтобетона типа Б с учетом присутствия высококальциевых зол-уноса в составе

Наименование материалов	Содер- жание, %	Содержание зерен мельче данного размера, (мм), в % по массе											
		40	20	15	10	5,00	2,50	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	
Щебень (10–15)	28,38	28,4	28,4	16,5	4,9	3,2	2,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Щебень (5–10)	14,52	14,5	14,5	14,5	13,7	1,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Отсев	47,19	47,2	47,2	47,2	47,1	45,5	25,4	18,2	13,1	9,2	5,7	3,2	
МП	9,31	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,0	6,7	
Зерновой состав		100,0	100,0	88,1	75,7	60,0	38,0	28,5	23,4	19,4	15,7	10,8	
Требования ГОСТ	min	90	90	80	70	50	38	28	20	14	10	6	
	max	100	100	100	100	60	48	37	28	22	16	12	

В соответствии с ГОСТ 12801–98 [228] из полученных в лабораторных условиях смесей были подготовлены образцы асфальтобетона, полученные прессованием под давлением $40,0 \pm 0,5$ МПа. Затем не ранее чем через сутки образцы подвергались испытаниям на прочность при температурах 0, 20 и 50 °С, сдвигоустойчивость, трещиностойкость, водонасыщение, водостойкость при кратковременном и длительном воздействии воды.

Анализ полученных результатов испытаний составов на основе битума, структурированного алюмосиликатным техногенным сырьем, показывает, что использование как низкокальциевых, так и высококальциевых зол-уноса в качестве структурирующей добавки позволяют значительно повысить физико-механические характеристики асфальтобетонов. Однако в зависимости от вида применяемой золы значения физико-механических характеристик несколько разнятся (таблица 4.5).

Наиболее важными характеристиками для асфальтобетона являются водостойкость при кратковременном водонасыщении, водостойкость при длительном, водонасыщение и набухание. Использование битума структурированного золами-уноса различного состава позволяет получать асфальтобетоны с повышенными показателями водостойкости как при кратковременном (2,22–8,89 %), так при длительном водонасыщении (1,28–15,38 %) (таблица 4.4, рисунок 4.17).

Однако существуют и исключения – показатель водостойкости при кратковременном водонасыщении асфальтобетона на основе битума, структурированного золой-уноса Columbia Energy Center (США) снижается на 1,11 % в сравнении с контрольным составом асфальтобетона на основе чистого битума, показатель водостойкости при длительном водонасыщении асфальтобетона на основе битума, структурированного золой-уноса Новотроицкой ТЭС снижается на 1,28 %.

Что же касается водонасыщения образцов асфальтобетона, то использование золобитумных вяжущих приводит к снижению водонасыщения от 0,28 до 0,58 % (таблица 4.4, рисунок 4.18) в сравнении асфальтобетоном на основе чистого битума, но в случае с золой-уноса Троицкой ГРЭС (РФ) приводит к его повышению на 0,4 %.

Таблица 4.5 – Физико-механические характеристики асфальтобетона
в зависимости от применяемого золобитумного вяжущего

Показатели	Требования ГОСТ 9128– 2013 на тип Б III марку III ДКЗ	Применяемое золобитумное вяжущее						
		Чистый битум	ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ)	ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ)	ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ)	WE Energies (США)	Columbia Energy Center (США)	ЗУ Назаровской ТЭС (РФ)
Содержание битума в смеси, %	5,0–6,5	6,0	5,1	5,1	5,1	5,1	5,4	5,4
Содержание золы-уноса, %	–	0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,6	0,6
Предел прочности при сжатии, МПа:								
– при температуре 50 °С	не менее 0,9	1,6	2,2	2,3	2,3	2,5	2,9	2,5
– при температуре 20 °С	не менее 2,0	3,8	5,2	5,4	5,1	4,4	6,0	6,2
– при температуре 0 °С	не более 12,0	10,1	9,8	9,7	9,9	9,9	9,8	9,8
Сдвигоустойчивость по:								
– коэффициенту внутреннего трения	не менее 0,80	0,84	0,85	0,87	0,91	0,87	0,80	0,88
– сцеплению при сдвиге при температуре 50°С	не менее 0,34	0,75	0,72	0,75	0,69	0,69	0,86	0,62
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С, МПа	не менее 2,5 и не более 7,0	4,1	4,3	4,2	4,4	4,2	4,2	4,2
Водостойкость	не менее 0,75	0,90	0,94	0,97	0,92	0,98	0,89	0,93
Водонасыщение, %	от 1,5 до 4,0	1,8	1,75	1,58	1,53	1,62	1,52	1,55
Набухание, %	–	0,02	0,001	0,001	0,001	0,002	0,007	0,002
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0,65	0,78	0,79	0,88	0,77	0,90	0,84	0,82

Набухание образцов асфальтобетона на основе золобитумных вяжущих составило лишь 0,001–0,007 %, в то время как набухание контрольного состава асфальтобетона составило 0,02 % (таблица 4.4, рисунок 4.19).



Рисунок 4.17 – Водостойкость асфальтобетонов
на основе золобитумных вяжущих

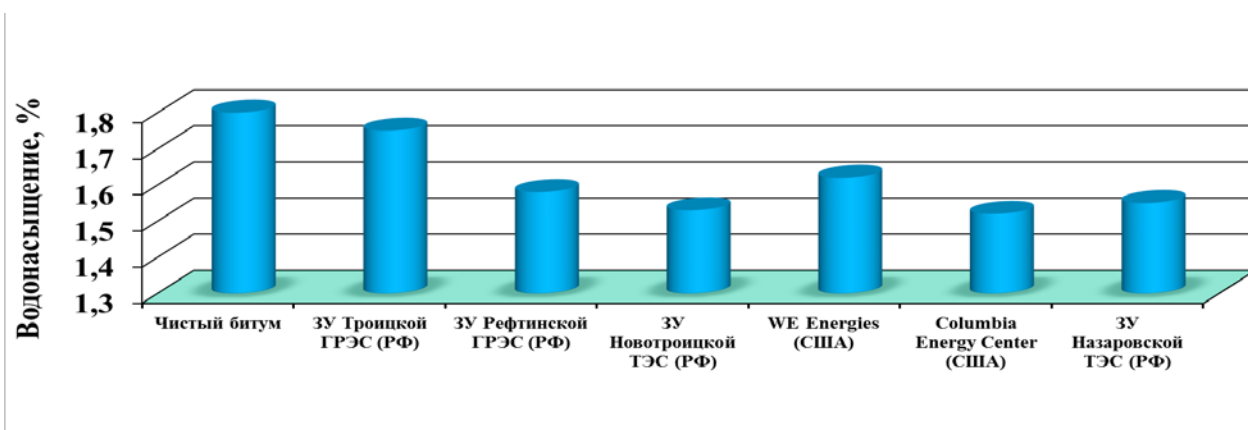


Рисунок 4.18 – Водонасыщение образцов асфальтобетона
на основе золобитумных вяжущих

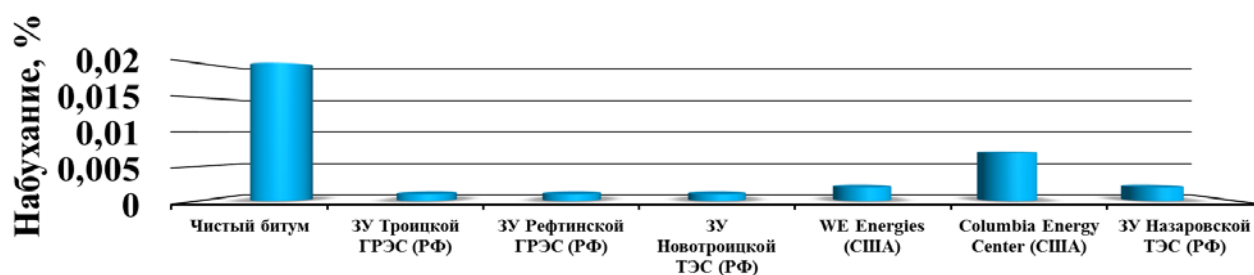


Рисунок 4.19 – Набухание образцов асфальтобетона
на основе золобитумных вяжущих

Стоит отметить, что использование вяжущих структурированных алюмосиликатным техногенным сырьем приводит к оптимизации структуры битумо-минеральных композитов в целом. Это способствует повышению сдвигоустойчивости

по коэффициенту внутреннего трения (на 4,76–8,33 %) (рисунок 4.20) и трещиностойкости (на 2,43–7,32 %) (рисунок 4.21) асфальтобетона. Но есть и исключения, использование вяжущего структурированного ЗУ Columbia Energy Center (США) приводит к снижению сдвигоустойчивости по коэффициенту внутреннего трения на 4,76 %.

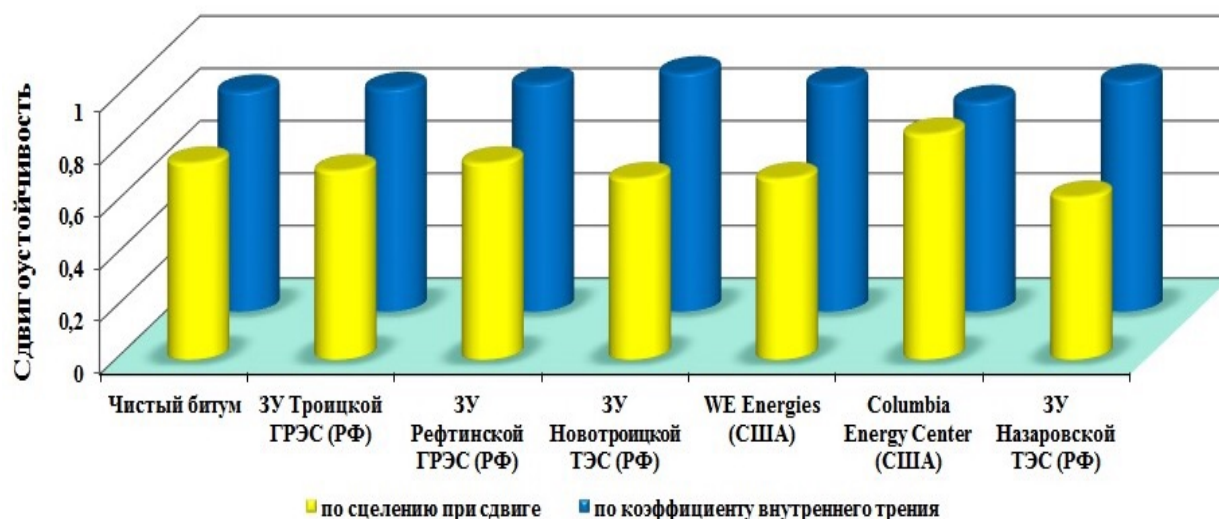


Рисунок 4.20 – Показатели сдвигоустойчивости асфальтобетона на основе золобитумных вяжущих



Рисунок 4.21 – Трещиностойкость асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих

Таким образом, применение золобитумных вяжущих структурированных алюмосиликатным техногенным сырьем из отходов топливно-энергетических предприятий позволяет существенно повысить качество асфальтобетона для

устройства верхних слоев покрытия, что в свою очередь позволит повысить технико-эксплуатационные характеристики и долговечность автомобильных дорог. Подтверждением этому служат высокая сдвигоустойчивость и трещиностойкость полученных асфальтобетонов, которые свидетельствуют об устойчивости композитов к погодным факторам – высокие температуры в летний период, низкие – в зимний.

У асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих отмечается так же значительное повышение пределов прочности при сжатии (рисунок 4.22), в частности при температурах 40 °С (на 37,5–81,25 %) и 20 °С (на 15,79–63,16 %).

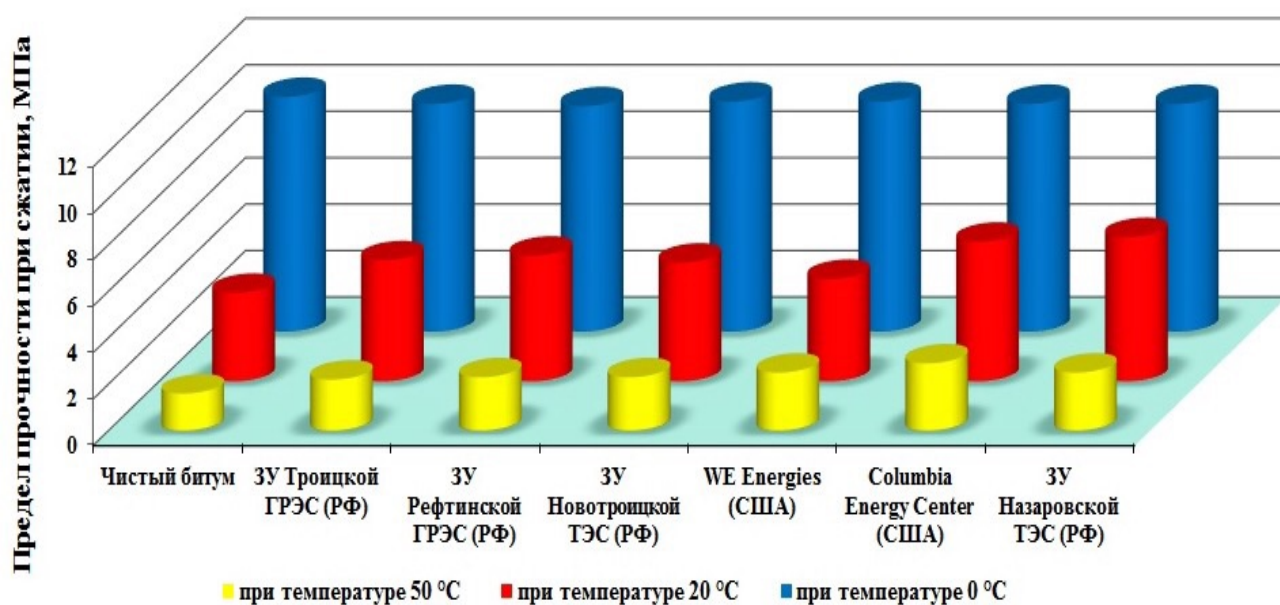


Рисунок 4.22 – Прочностные показатели асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что асфальтобетоны на основе золобитумных вяжущих с использованием отходов от сжигания твердого топлива являются менее хрупкими при низких температурах и при этом имеют достаточную прочность. Стоит отметить, что при использовании пористых наполнителей, коими являются золы-уноса, происходит поглощение смол и масел из адсорбционных слоев битума поверхностью минерального материала, приводящее к повышению вязкости структурированного битума в сравнении с исход-

ным, при этом снижается и температура хрупкости. Этот факт положительно влияет на трещиностойкость, получаемых асфальтобетонов, и согласуется с работами других авторов, изучающих пористые наполнители с точки зрения применения в асфальтобетонах [210, 211, 229].

Совокупность полученных результатов испытаний образцов асфальтобетона на основе золобитумных вяжущих структурированных алюмосиликатным техногенным сырьем позволяет говорить о высоких физико-механических характеристиках полученных композитов и полном соответствии их требованиям ГОСТ. Высокие физико-механические характеристики асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих являются подтверждением полученных результатов испытаний битума структурированного золами-уноса различного состава, которые обусловлены высокой структурирующей способностью алюмосиликатного сырья вследствие высокой дисперсности, особенностей микроструктуры и высокой активности по отношению к битуму за счет химико-минерального состава и значительной концентрации активных адсорбционных центров на поверхности.

Применение золобитумных вяжущих с использованием алюмосиликатного техногенного сырья из отходов от сжигания твердого топлива топливно-энергетическими предприятиями для асфальтобетонных смесей позволит значительно повысить качество и долговечность автомобильных дорог. По совокупности физико-механических характеристик асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих, применяемое техногенное сырье в виде зол-уноса можно проранжировать по степени повышения эффективности использования в следующей последовательности: WE Energies (США) → ЗУ Новотроицкой ТЭС (РФ) → ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) → ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ) → Columbia Energy Center (США) → ЗУ Назаровской ТЭС (РФ).

4.4. Устойчивость асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих к колееобразованию

В настоящее время наиболее распространенным дефектом покрытий автомобильных дорог является колея. Это связано с интенсивным ростом числа транспортных средств и одновременным увеличением их грузоподъемности, что

предопределяет актуальность разработки и внедрения новых высококачественных и долговечных композитов для дорожного строительства. При этом пристальное внимание следует уделять технико-эксплуатационным характеристикам получаемых материалов. Использование стандартных методов является обязательным, но не всегда позволяет в полной мере оценить качество дорожно-строительных материалов. В связи с этим целесообразно применение новых, моделирующих методов исследования и оборудования, что позволит оценить стойкость материалов против остаточной деформации.

Стойкость материалов против остаточной деформации или устойчивость асфальтобетона к колееобразованию определяли в соответствии с европейским стандартом EN 12697–22 [214] с использованием аппарата для испытания колесной нагрузкой InfraTest Prütechnik GmbH (Германия). Принцип данного метода заключается в том, что чувствительность асфальтобетона к деформации оценивается посредством измерения глубины колеи, возникающей в результате многократного воздействия нагруженного колеса при постоянной температуре.

Подготовку и выполнение испытания проводили следующим образом:

1) С помощью роликового компактора InfraTest Prütechnik GmbH 20-4030 (Германия) из плотной смеси типа Б были подготовлены образцы асфальтобетонных плит размером 320×260×40 мм.

2) В течение 12–48 часов полученные образцы выдерживали на воздухе при температуре 20 ± 2 °С.

3) Подготовленные образцы асфальтобетона в виде плит помещали на испытательные столики (прибора левый и правый, т.к. испытания проводят на 2 образцах асфальтобетона одинакового состава) для испытания колесной нагрузкой, закрепляя их обжимными формами и выдерживая в камере прибора до достижения требуемой температуры испытания (30–70 °С).

4) В зависимости от марки используемого битума выбирают температуру испытания, которая для асфальтобетона типа Б на основе битума 60/90 и золотистых вяжущих составила 70 °С.

5) Достигнув требуемой температуры образцы подвергали испытанию колесной нагрузкой 710 Н до момента, когда глубина образовавшейся колеи была равна максимально допустимому значению 20 мм.

В настоящей работе испытания проводили с образцами асфальтобетона типа Б на основе битума без добавок и на основе битума, структурированного 6 видами зол-уноса (4-х низкокальциевых и 2-х высококальциевых). С целью удобства сравнения полученных данных, результаты испытаний были сведены в единый график (рисунок 4.23).

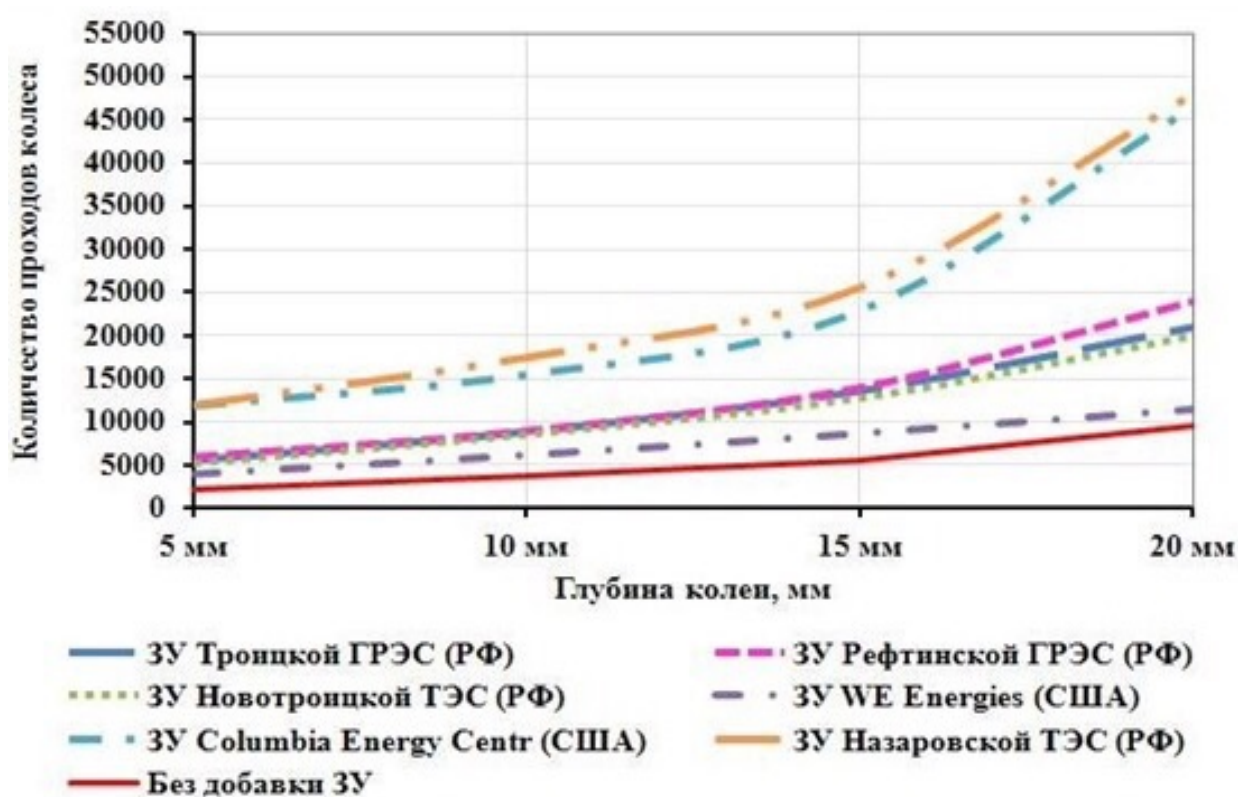


Рисунок 4.23 – Устойчивость асфальтобетонов
на основе золобитумных вяжущих к колееобразованию

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что у асфальтобетона с исходным битумом, без использования добавки, максимальная глубина колеи (20 мм) образуется при 9600 проходах колеса. Использование же золобитумных вяжущих для асфальтобетонных смесей позволило повысить колеестойкость.

Среди образцов на основе вяжущего с использованием низкокальциевых зол наибольшую устойчивость к колееобразованию показали образцы с ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ), количество проходов до достижения колеи 20 мм составило 24000, что в 1,5 раза выше, чем у контрольных образцов на основе битума без добавки. Подобное влияние используемой золы-уноса можно объяснить влиянием активности золы по отношению к вяжущему, что позволяет положительно повлиять на свойства битума и асфальтобетона на его основе. Менее устойчивыми оказались образцы с использованием ЗУ Троицкой ГРЭС (РФ) и Новотроицкой ТЭС (РФ). Для них количество проходов составило 21000 и 20000, что в 1,18 и 1,08 раза соответственно выше значений контрольных образцов, но лишь на 3000 и 4000 соответственно ниже асфальтобетона с использованием ЗУ Рефтинской ГРЭС (РФ). Близкие по значениям результаты с использованием этих зол обусловлены схожестью в составе и наличием частиц неправильной формы, состоящих преимущественно из углерода, позволяющих практически в равной степени оказывать влияние как на свойства вяжущего, так и асфальтобетона. Наименее устойчивым к колееобразованию показал себя для асфальтобетона на основе золобитумного вяжущего с ЗУ WE Enrgies (США), в данном случае количество проходов составило лишь 11500, что лишь на 1900 проходов больше в сравнении с контрольными образцами. Возможно столь малый эффект от использования данного представителя ЗУ можно объяснить меньшей активностью по отношению к битуму, которая обусловлена меньшим количеством степеней полимеризации стеклофазы в золах.

Для асфальтобетонов с использованием высококальциевых зол-уноса Columbia Energy Center (США) и Назаровской ТЭС (РФ) количество проходов составило 47600 и 48000. Это в 4,95 и 5 раз выше в сравнении с контрольными образцами асфальтобетона. Столь положительный эффект обусловлен хорошим взаимодействием вяжущего с ЗУ в силу высокого содержания СаО.

Таким образом, при испытании образцы асфальтобетонов с использованием зол-уноса различного состава во всех случаях показывают повышение устойчивости к колееобразованию, при этом степень эффективности от использования того

или иного представителя техногенного сырья обусловлена особенностями его состава или строения. Кроме того, положительный эффект от использования всех видов зол можно объяснить тем, что в силу своей дисперсности и морфологии поверхности они позволяют получить более плотную структуру асфальтобетона способную лучше сопротивляться воздействию внешних факторов в сравнении с асфальтобетоном без добавок.

4.5. Выводы

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования зол-уноса ТЭС в качестве структурирующей добавки к битуму при производстве асфальтобетона. Показано, что структурирующая роль зол-уноса, обусловленная видом и технологией сжигания топлива, а также удаления зольных отходов, заключается в интенсификации процессов хемосорбции в результате взаимодействия битумной пленки с поверхностью алюмосиликатного модификатора за счет особенностей его химико-минерального состава и физической адсорбции за счет морфоструктурных факторов. Это в совокупности позволяет повысить физико-механические и вязкоупругие свойства битума.

2. Анализ комплекса структурно-механических характеристик, определенных в соответствии с нормативными документами, позволяет сделать вывод о том, что использование как низкокальциевых, так и высококальциевых зол-уноса улучшает как отдельные параметры вяжущего, так и качество вяжущего в целом. При этом состав золы, морфоструктурные особенности и кислотно-основные свойства являются определяющими факторами, позволяющими в большей или меньшей степени структурировать битум.

3. Изучение реологических характеристик битума с использованием техногенного сырья из отходов топливно-энергетической промышленности в виде зол-уноса различных производств с концентрацией их 5, 10 и 15 % от массы битума позволяет сделать вывод о том, что золы-уноса являются эффективными добавками, позволяющими увеличивая вязкость повысить устойчивость вяжущего к де-

формациям при температурах, моделирующих условия работы покрытия в летний период. При этом наибольший эффект от использования добавок наблюдается при содержании низкокальциевых зол-уноса в количестве 15 % от массы битума, а высококальциевых – 10 %.

4. Установлен характер влияния зол-уноса на реотехнологические и физико-механические свойства золобитумного вяжущего в зависимости от их состава. Использование полидисперсного алюмосиликатного модификатора в качестве структурирующего компонента приводит к оптимизации структуры вяжущего, расширению диапазона эксплуатационных температур, повышению устойчивости к напряжениям сдвига, температуры размягчения и снижению пенетрации. В целом это позволяет повысить теплостойкость асфальтобетона на основе золобитумных вяжущих и его деформативную устойчивость при эксплуатации в летний период.

5. При исследовании возможности использования техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол-уноса ТЭС различного состава показано, что использование методов, рекомендованных нормативными документам является обязательным, но не является достаточным. Так, по пористости и битумоемкости ряд зол-уноса характеризуются как непригодные к использованию в качестве структурирующего компонента вяжущего. Однако, использование альтернативных методов исследований позволило определить ряд положительных свойств зол-уноса, и полученные композиции с их использованием показали удовлетворительные результаты. С целью выявления возможности применения иных видов зол-уноса ТЭС в качестве добавки, структурирующей битум показана информативность следующих характеристик: удельной поверхности, удельной активной поверхности с учетом нанопор в общей пористости материалов, морфоструктурных особенностей, химического и минерального составов и активности. С учетом химико-минерального состава и морфоструктурных особенностей зол-уноса наиболее показательной характеристикой для золобитумного вяжущего является сдвигоустойчивость, наименее достоверными являются рас-

тяжимость и температура хрупкости, что связано с особенностями методик испытаний.

6. Произведено ранжирование зол-уноса различного состава по степени эффективности их использования в качестве модифицирующих агентов золобитумного вяжущего по физико-химическим и технологическим критериям. По совокупности результатов проведенных исследований установлена следующая последовательность повышения структурирующей роли зол-уноса проанализированных видов: WE Energies (низкокальциевая, США) → ЗУ Новотроицкой ТЭС (низкокальциевая, РФ) → ЗУ Троицкой ГРЭС (низкокальциевая, РФ) → ЗУ Рефтинской ГРЭС (низкокальциевая, РФ) → Columbia Energy Center (высококальциевая, США) → ЗУ Назаровской ТЭС (высококальциевая, РФ).

7. Предложен принцип проектирования золобитумного вяжущего для асфальтобетонов с использованием высокодисперсных алюмосиликатных отходов ТЭС – зол-уноса различного состава, заключающийся в оценке химико-минеральных и морфоструктурных особенностей зол-уноса, а также реотехнологических свойств золобитумного вяжущего по методу Supergrave в измерительной системе пластина/пластина (РР) в диапазоне температур от +46 до +76 °С с приложением осциллирующей нагрузки при определении структурирующей способности алюмосиликатных модификаторов по отношению к битуму.

8. Разработаны рациональные составы золобитумных вяжущих с применением структурирующей добавки в виде зол-уноса различных предприятий. Предложены составы асфальтобетонных смесей на основе золобитумных вяжущих, позволяющие производить асфальтобетоны типа Б с прочностями при сжатии при температурах 50, 20 и 0 °С 2,2–2,9 МПа, 4,4–6,2 МПа и 9,7–9,9 МПа соответственно; сдвигоустойчивостью по коэффициенту внутреннего трения 0,85–0,91, по сцеплению при сдвиге при температуре 50 °С 0,62–0,86; трещиностойкостью 4,0–4,3 МПа; водостойкостью 0,89–0,98; водонасыщением 1,52–1,75 % и водостойкостью при длительном водонасыщении 0,77–0,9.

9. Совокупность полученных результатов испытаний образцов асфальтобетона на основе золобитумных вяжущих структурированных алюмосиликатным

техногенным сырьем позволяет говорить о повышении физико-механических характеристик полученных композитов и полном соответствии их требованиям ГОСТ. Высокие физико-механические характеристики асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих являются подтверждением полученных результатов испытаний битума структурированного золами-уноса различного состава, и обусловлены высокой структурирующей способностью алюмосиликатного сырья вследствие высокой дисперсности, морфоструктурных особенностей и высокой активности по отношению к битуму за счет химико-минерального состава и значительной концентрации активных адсорбционных центров на поверхности.

5. ТЕХНОЛОГИЯ И ТЭО ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОБИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

Большой интерес в современном дорожном строительстве представляет асфальтобетон как наиболее популярный материал для устройства покрытий дорожных одежд. Его производство и укладка связаны с высокими затратами как материальных, так и трудовых ресурсов [231]. Значительная доля затрат связана с приобретением сырьевых компонентов для приготовления смеси, как инертных, так и вяжущих материалов. В связи с этим необходимо изучение возможности минимизации затрат за счет снижения стоимости материальной компоненты смеси, что становится возможным вследствие применения альтернативных сырьевых материалов.

5.1. Технология производства асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих

Асфальтобетонные заводы (АБЗ) являются основными производственными предприятиями дорожного хозяйства и предназначены для приготовления различных асфальтобетонных смесей для строительства, реконструкции и ремонта слоев асфальтобетонного покрытия [232].

Асфальтобетонный завод может быть стационарным или мобильным, циклического (производительность которого колеблется в пределах от 100 до 300 тонн в час) или непрерывного действия (производительностью от 50 до 600 тонн в час). Классификация асфальтобетонных заводов возможна по ряду критериев:

- *по типу размещения*: прирельсовые и притрассовые (приобъектные);
- *по длительности работы на одном месте*: стационарные, инвентарные (перебазир�уемые) и передвижные (часто перебазир�уемые);
- *по количеству и суммарной производительности асфальтосмесительных установок*.

Для обеспечения бесперебойной работы асфальтобетонного завода необходимо выполнение следующих технологических операций:

- по приготовлению смесей, включая предварительное дозирование минеральных материалов, их нагрев и сушку, сортировку (грохочение) и кратковременное хранение нагретых каменных материалов, точное дозирование минеральных материалов, битума или другого специального вяжущего, минерального порошка и добавок, смешение составляющих в мешалке и выгрузка из мешалки готовой (товарной) асфальтобетонной смеси;
- по приему, хранению и подаче в бункеры по фракциям каменных материалов, а при необходимости получение на АБЗ необходимых по крупности фракций щебня и песка путем дробления и сортировки более крупных фракций щебня;
- по приему, хранению, нагреву и подаче в дозаторы битума;
- по приему, хранению и подаче в дозатор минерального порошка (заполнителя);
- по приему, хранению, нагреву и подаче в дозатор поверхностно-активных веществ (ПАВ);
- по складированию, кратковременному хранению и отгрузке готовой асфальтобетонной смеси.

Для выполнения всего комплекса технологических операций в состав АБЗ входит основное и вспомогательное технологическое оборудование.

К основному относятся следующие устройства:

- асфальтосмесительные установки;
- приемные устройства для каменных материалов, площадки для их хранения и машины для их подачи в бункеры асфальтосмесительных установок;
- приемные устройства для битума, хранилища (емкости) для битума, битумонагревательное оборудование, битумные насосы;
- приемные устройства и площадки для бочек с ПАВ или емкости для ПАВ, нагреватели для ПАВ и насосы для их подачи к смесителю;

- приемные устройства и емкости для хранения минерального порошка и насосы (пневмосистемы) для подачи его к смесителю;
- загрузочное устройство (скап или элеватор) готовой смеси, бункеры-накопители готовой смеси;
- дробильно-сортировочное оборудование для получения требуемых фракций щебня и песка.

Помимо основного технологического оборудования в состав АБЗ могут входить:

- оборудование для приготовления и хранения битумных эмульсий;
- хранилища топлива (газа, дизтоплива или мазута);
- постройки административно-бытового назначения;
- объекты электроэнергетического обеспечения;
- котельные;
- компрессорные станции;
- водопроводное хозяйство;
- сети электро-, тепло- и водоснабжения;
- лаборатория;
- ремонтная мастерская;
- материально-технический склад.

Асфальтобетонный завод имеет следующие технологические узлы:

- расходные склады минеральных материалов;
- битумоплавильный узел;
- узел приготовления смеси.

Расходный склад щебня (гравия) и песка представляет собой открытую площадку с бетонным покрытием, разделенную стенками, на отсеки для каждой фракции, под которой проходит подземная транспортная галерея.

Материалы подаются на ленту транспортера из штабелей расходного склада через вибропитатели. Минеральный порошок подается из расходного склада силосного типа в отсек «горячего» бункера элеватором.

Битумоплавильный узел включает битумохранилище закрытого типа и битумоплавильную установку. Битум в хранилище разогревается электрическими нагревателями и подается в котлы битумоплавильной установки битумными насосами по трубопроводам.

Битумоплавильная установка имеет котлы емкостью 15 000 л, оборудованные механическими мешалками и электротермическими элементами. На битумоплавильном узле установлен силос для хранения золы-уноса, дозатор и шнековый транспортер, системы трубопроводов обогреваются электрическим током.

Узел приготовления смеси состоит из одной, двух или более смесительных установок, включающих сушильный и смесительный агрегаты. Сушильный агрегат состоит из сушильного барабана и холодного элеватора. Смесительный агрегат включает в себя горячий элеватор, цилиндрический грохот, бункер для горячих каменных материалов, дозирочное устройство и мешалку.

Таким образом, типовая технологическая схема асфальтобетонного завода имеет следующий вид (рисунок 5.1):

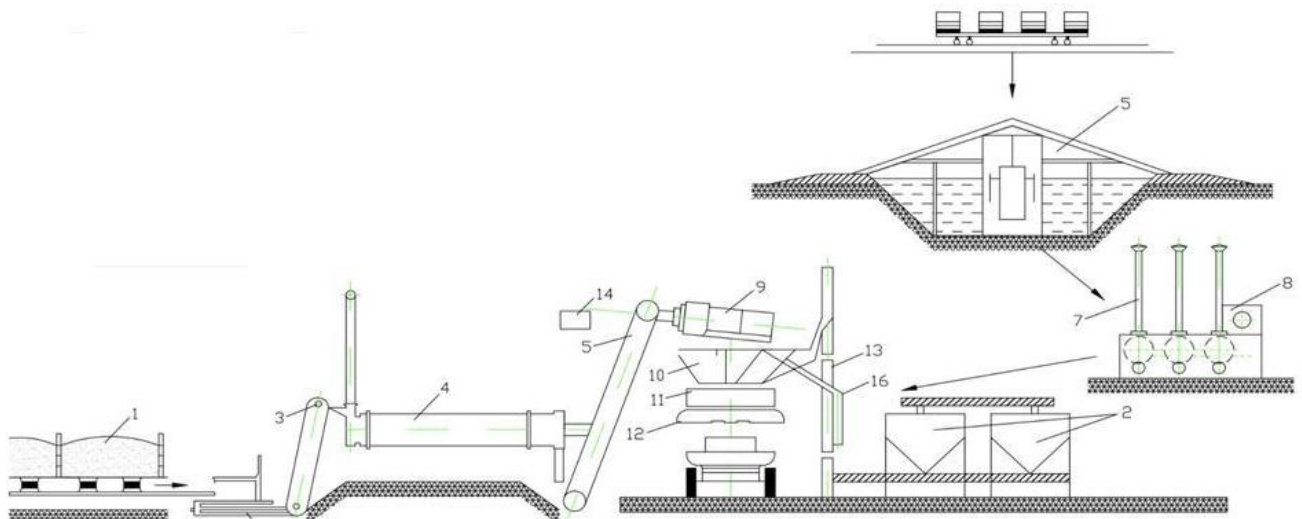


Рисунок 5.1 – Технологическая схема АБЗ

- 1 – расходный склад щебня и песка; 2 – склад минерального порошка;
 3 – холодный элеватор; 4 – сушильный барабан; 5 – горячий элеватор;
 6 – битумохранилище; 7 – битумоплавильная батарея; 8 – узел подачи золы-уноса;
 9 – цилиндрический грохот; 10 – горячий бункер; 11 – бункер весовой дозировки;
 12 – мешалка; 13 – элеватор для подачи минерального порошка; 14 – пульт управления; 15 – питатель; 16 – лоток для сброса щебня

Основным элементом классического асфальтобетонного завода является система подачи инертных материалов, предварительно дозирующая холодные инертные материалы, такие как щебень и песок, которые по наклонному конвейеру подаются в сушильный барабан, где нагреваются до заданной температуры потоками газа.

Дозирование холодных инертных материалов осуществляется из холодных дозаторов, являющихся именно дозирующим устройством и обеспечивающих высокую точность дозирования с погрешностью 5,1 %. Это достигается благодаря современному микропроцессорному управлению, приводам с частотным управлением, тахометрам на приводных валах с обратной связью и весовому мосту, установленному в наклонном конвейере. Холодные инертные материалы точно дозируются из бункеров и подаются на наклонный конвейер, оснащенный грохотом негабарита, отсеивающим негабаритный щебень. Поток материала после грохота попадает на весовой мост, который динамически взвешивает суммарный объем инертных и корректирует работу дозаторов через систему обратной связи с программой управления. Взвешенный материал попадает в сушильно-смесительный барабан, где он сушится потоком нагретого газа от пламени горелки. После сушки нагретый материал смешивается в этом же агрегате с минеральным порошком, собственной пылью, битумом и другими компонентами. Полученная смесь выгружается из сушильно-смесительного барабана. Традиционно для хранения смеси применяют силосы круглого сечения со скребковым конвейером [233]. Нагретые инертные подаются на элеватор горячих инертных материалов и далее на цилиндрический грохот, который рассеивает поток материала на разные фракции согласно количеству и размеру ячеек сит [234]. Очистка отходящих горячих газов из сушильного барабана происходит в рукавном фильтре, где осаждается пыль с помощью тканевых мешков (рукавов).

Битумохранилище на асфальтобетонном заводе обычно располагают у железнодорожных подъездных путей, а при наличии водного пути – у пристани. Битумоплавильные котлы стараются разместить ближе к битумохранилищу, но в этом случае они могут оказаться далеко от смесителей, что приводит к необходи-

мости установки отдельных расходных котлов у смесительных агрегатов. Разогрев битума может осуществляться: паровыми змеевиками, жаровыми трубами и электронагревательными элементами. Электронагрев наиболее гигиеничен и прогрессивен, так как дает возможность автоматически регулировать и поддерживать заданную температуру. Подача битума к смесителям осуществляется битумными насосами по обогреваемым трубопроводам.

В битумохранилище битум разогревают до температуры 80–100 °С и насосом подают на битумоплавильную установку в котлы первичного нагрева битума. Битум нагревают в котлах первичного нагрева до температуры 110–120 °С и, непрерывно перемешивая его механическими мешалками, выдерживают при этой температуре до полного выпаривания влаги. Обезвоженный битум битумным насосом подается в рабочие котлы, где его подогревают до рабочей температуры, производят смешивание с золой-уноса, после чего перекачивают на весовую дозировку смесительной установки.

Температура нагрева битума в рабочих котлах контролируется лабораторией через каждый час и записывается в журнале, во избежание потери вязкости нельзя держать битум в котлах при температуре 130–150 °С более 5 ч.

Приготовление золобитумного вяжущего происходит в результате введения золы-уноса ТЭС в разогретый битум и последующего смешения компонентов. Введение золы-уноса в битум не представляет никакой сложности, и процесс состоит из трех этапов: 1) нагрев битума до температуры 130 ± 10 °С; 2) введение золы в разогретый битум; 3) перемешивание в течение 30 минут. Перемешивание производится в битумоплавильных котлах в процессе текущей работы оборудования. Применение специального оборудования не требуется, так как технология приготовления традиционной асфальтобетонной смеси на АБЗ предусматривает наличие битумоплавильных котлов. Модифицированный битум затем используется для приготовления асфальтобетонной смеси вместо обычного битума. При этом использование золобитумного вяжущего не предусматривает изменения конструкции АБЗ, учитывая тот факт, что вязкость модифицированного битума в нагретом состоянии не выше вязкости чистого битума. Таким образом, для приго-

товления золобитумного вяжущего не требуется использования дорогостоящего оборудования, как для модификации битума, например, полимерами (коллоидных мельниц и т.п.).

Однако для проведения работ по получению золобитумного вяжущего необходимо включение в перечень оборудования АБЗ: силоса для хранения золы-уноса ТЭС, дозатора и шнекового транспортера (рисунок 5.2).

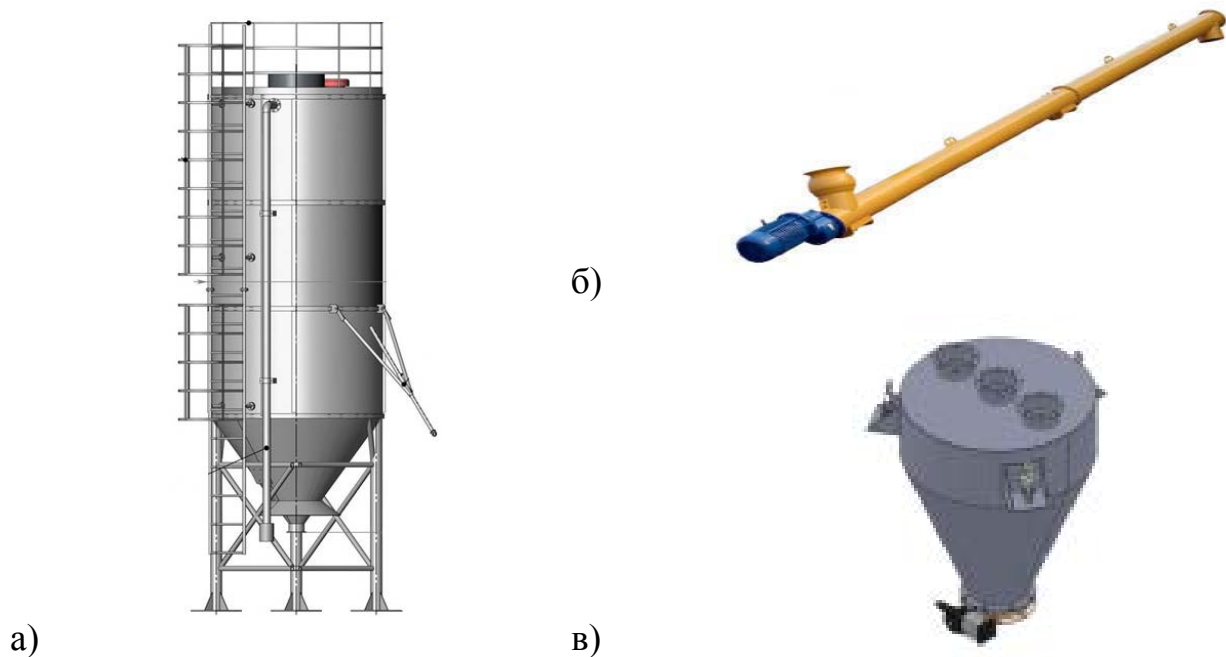


Рисунок 5.2 – Дополнительное оборудование для получения золобитумного вяжущего: а – силос (12 тонн=8 м³); 2 – шнековый транспортер ES (диаметр 219мм длина 4 метра); 3 – дозатор ДВ-400 (объем 400 литров)

Дополнительное оборудование имеет следующие особенности, характеристики и габариты:

1. *Силос для хранения золы-уноса.* Все детали силосов и несущий каркас изготавливаются из высококачественной стали толщиной 6–10 мм, покрытой защитным антикоррозийным составом. В каждом силосе устанавливается электрический вибратор, обеспечивающий равномерное распределение сырья внутри. Для работы в зимнее время силосы можно обшивать снаружи многослойным утеплителем.

Комплектация склада включает силос, опорные конструкции, загрузочную трубу, площадка обслуживания, лестница и ограждения.

Для загрузки золы в силос используется шнековый транспортер, типовые размеры силоса: объем 8 куб. м. – 10 тонн (диаметр – 2,4 метра, высота 5 метров, масса 2 тонны).

2. *Шнековый транспортер* марки ES диаметром 219мм длиной 4 метра (рисунок 5.3).

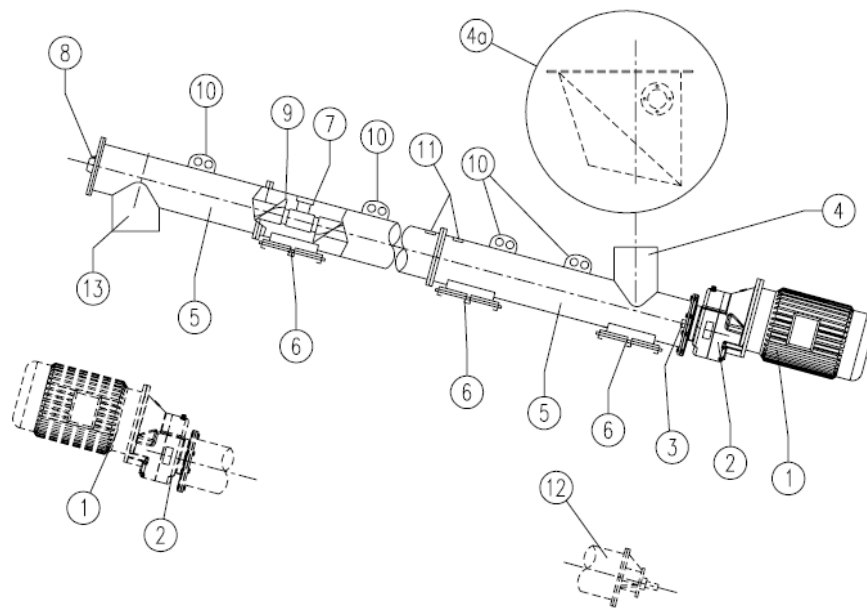


Рисунок 5.3 – Устройство шнекового транспортера:

1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – уплотнение вала редуктора; 4 – входной патрубок; 4а – объемная бункерная воронка на входном отверстии; 5 – трубчатый кожух; 6 – смотровой люк; 7 – промежуточный подшипник; 8 – выходной концевой подшипник; 9 – спираль; 10 – подъемный рым; 11 – серийный номер; 12 – входной концевой подшипник; 13 – выходной патрубок

Шнек ES выполнен из углеродистой стали с соответствующей внешней обработкой и с порошковой окраской. Шнек состоит из трубчатого кожуха с загрузочной и разгрузочной горловинами и с концевыми приваренными кольцами, вращающимся винтом с соединительными втулками в комплекте, двумя концевыми подшипниками с набором прокладок длительного срока действия, установленными непосредственно на концевые кольца, а также промежуточными под-

шипниками в зависимости от длины станка. Кроме того, шнек оснащен редукторным двигателем.

Основные преимущества шнекового транспортера состоят в долгом сроке службы, малом весе, отсутствии необходимости в техническом обеспечении; легком процессе установки, благодаря универсальным загрузочной и разгрузочной горловинам; малым габаритам и компактной установке, а также малом количестве составных частей и запасных деталей.

3. *Дозатор ДВ-400.* Весовой дозатор сыпучих материалов представляет собой емкость (рисунок 5.4, таблица 5.1), которая висит на раме. В местах крепления к раме устанавливаются тензодатчики, которые передают информацию о текущем весе емкости на центральный пульт. Стандартно, наверху дозатора делается три фланца для присоединения шнековых транспортеров, для подачи материала в дозатор и фильтра дозатора, для отсечения пыли от выходящего из дозатора потока воздуха.

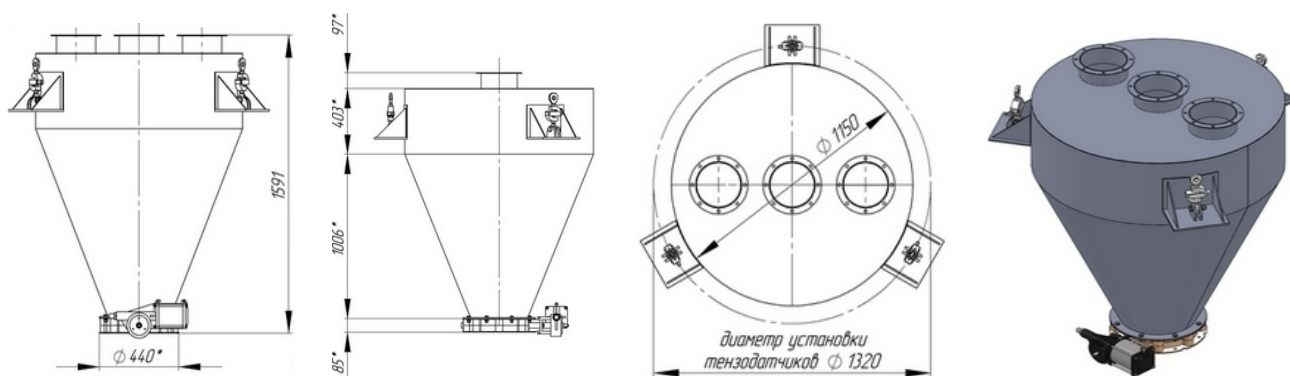


Рисунок 5.4 – Устройство дозатора ДВ-40

Таблица 5.1 – Технические характеристики дозатора ДВ-40

Технические характеристики	Значение
Пределы дозирования, кг	20–500
Погрешность дозирования, не более %	0,5
Давления воздуха для пневмосистемы, атм	6
Масса, кг	160

В стандартную комплектацию включены: дозатор, три верхних патрубка для подачи материалов в дозатор, нижняя пневмоздвижка с пневмоцилиндром,

тензодатчики.

Далее процесс смешения компонентов смеси происходит следующим образом. В мешалке минеральные материалы в течение не менее $1/3$ от общего времени перемешивания проходят «сухое» перемешивание, при котором нагревается минеральный порошок. Затем в мешалку подается отдозированное золобитумное вяжущее, и, после перемешивания в течение установленного лабораторией времени, готовая смесь выгружается в кузов автомобиля.

Температура нагрева минеральных материалов назначается лабораторией, в зависимости от заданной температуры выпускаемой смеси и не должна превышать 200–220 °С. Степень нагрева материалов в сушильном барабане контролирует машинист смесителя с помощью термопар и других датчиков.

При выходе из сушильного барабана минеральные материалы должны быть сухими. При остаточной влажности следует уменьшить количество материалов, проходящих через сушильный барабан, или увеличить пламя форсунки.

Влажность минеральных материалов после просушки и нагрева проверяется лабораторией в начале каждой смены, а также после изменений исходной влажности материалов. Пробы для определения влажности берут на выходе материалов из сушильного барабана, температура выпускаемых смесей должна быть в пределах 140–160°С. Время перемешивания минеральных материалов между собою и с битумом должно обеспечивать получение однородной по внешнему виду смеси с равномерным распределением в ней битума и составляет:

Качество перемешивания лаборатория контролирует проверкой времени перемешивания и внешним осмотром (отсутствие комков, жирных пятен, а также сухих не обработанных битумом частиц материалов). Окончательно физико-механические свойства смеси определяют в лаборатории испытанием проб смеси, взятых один – два раза в смену для одного и того же состава смеси.

При производстве асфальтобетонных смесей контролируют: качество всех компонентов, температурный режим подготовки битума, температуру нагрева минеральных материалов, температуру готовой смеси, качество готовой асфальтобетонной смеси.

В соответствии с действующими стандартами контроль подразделяется на три этапа: входной, операционный и приемочный.

При *входном* контроле устанавливают соответствие качества исходных материалов в каждой поступившей на АБЗ партии действующими стандартами.

Операционный контроль осуществляется не реже 1 раза в 10 смен с определением следующих показателей: зерновой состав щебня, песка, материалов из отсеков дробления и минерального порошка, содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне и песке, влажность минерального порошка и т.д. Для испытания отбирают пробы со складов материалов.

При контроле качества битума определяют глубину проникновения иглы при 25 °С вязкого битума и температуру размягчения по «Кольцу и Шару». Для этого отбирают пробы из каждого рабочего котла – 1 раз в смену. Кроме того, проверяют температуру нагрева битума через каждые 2–3 часа. В процессе приготовления асфальтобетонной смеси 2–3 раза в смену контролируют соблюдение установленного времени перемешивания минерального порошка с битумом.

Для *приемочного* контроля качества готовой асфальтобетонной смеси отбирают одну пробу от каждой партии. Партией считается количество асфальтобетонной смеси одного состава, изготовленного одной установкой в течение смены, но не более 600 т.

Температуру асфальтобетонных смесей проверяют в кузове каждого автомобиля-самосвала непосредственно после выпуска смесей из смесителя.

При приемочном контроле готовой смеси в лаборатории контролируют: температуру готовой смеси, зерновой состав и содержание битума, водонасыщение, набухание, предел прочности при сжатии при температуре 20 °С и 50 °С, коэффициент водостойкости.

Показатели физико-механических свойств должны соответствовать требованиям, предъявляемым ГОСТ 9128–2013 [24] к данному виду асфальтобетона.

Таким образом, учитывая тот факт, что технологическая линия не претерпевает особых изменений стоит отметить, что применение золобитумных вяжущих

в составе асфальтобетона позволит при незначительном перевооружении АБЗ добиться лучшего качества и более низкой стоимости асфальтобетонных смесей.

5.2. Техничко-экономическое обоснование эффективности применения золобитумных вяжущих для получения асфальтобетона

Рациональное использование ресурсов дорожного хозяйства в последнее время стало наиболее актуальной проблемой, при этом особую роль стоит отвести материальным затратам, в связи с высокой долей их в общей стоимости дорожно-строительных работ.

Испытания разработанных материалов показали улучшение физико-механических характеристик, при этом технико-экономическая эффективность обусловлена использованием недефицитных компонентов, составами изделий, подобранных с позиции увеличения их эксплуатационных характеристик, а также заменой части дорогостоящей битумной компоненты на материал, являющийся отходом топливно-энергетической промышленности, что в свою очередь также расширяет номенклатуру сырьевых материалов для дорожного строительства.

Введение золобитумных вяжущих в состав асфальтобетонной смеси позволяет повысить стабильность битума в составе смеси, прочностные характеристики, водостойкость и сдвигоустойчивость асфальтобетонных смесей, что в свою очередь позволяет говорить о повышении стойкости к остаточным деформациям и снижении колееобразования покрытия в процессе эксплуатации.

Для обоснования экономической эффективности использования асфальтобетона на основе золобитумного вяжущего был произведен расчет экономии материальных затрат для производства 1 т асфальтобетонной смеси разработанного материала и материала, полученного по традиционной технологии. Оценку эффективности предлагается провести при строительстве автомобильных дорог III технической категории в Белгородской области на период 2015–2019 годы с использованием действующих методик [235, 236].

Предпроизводственные (текущие) затраты на проведение НИР рассчитываются следующим способом:

$$C_{\text{НИР}} = C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ.Н}} + C_{\text{ЭКС}} + C_{\text{НТ}} + C_{\text{ПР}} + C_{\text{КОМ}}, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{МАТ}}$ – затраты на покупку комплектующих, изделий и полуфабрикатов необходимых для выполнения НИР, определяются по видам и группам, руб;

$C_{\text{ЗП}}$ – заработная плата (основная и дополнительная) научно-технического персонала, которая рассчитывается по формуле:

$$C_i = \sum_{i=1} C_i \times Z_{\text{ст}} \times T_{\text{НИР}} \times \left(1 + \frac{x}{100}\right) \quad (5.2)$$

где C_i – количество работников, выполняющих НИР, чел;

$Z_{\text{ст}}$ – оклад работника НИР, руб/мес;

$T_{\text{НИР}}$ – период выполнения НИР, мес.;

x – средний процент доплат к тарифному фонду (70 %).

$$C_{\text{ЗП}} = 1 \times 4\,000 \times 36 \times (1 + 70 / 100) = 244\,800 \text{ руб.}$$

$C_{\text{СОЦ.Н}}$ – страховые выплаты, сумма которых определяется по формуле (5.3):

$$C_{\text{СОЦ.Н}} = Z_{\text{пл}} \times \text{Соц.отч.}, \quad (5.3)$$

где $Z_{\text{пл}}$ – заработная плата работников;

Соц.отч. – процентная ставка:

$$C_{\text{СОЦ.Н}} = 244\,800 \times 0,3 = 73\,440 \text{ руб.}$$

$C_{\text{ЭКС}}$ – эксплуатационные затраты, сумма которых определяется по формуле (5.4):

$$C_{\text{ЭКС}} = C_A + C_{\text{ЭН}}, \quad (5.4)$$

где C_A – затраты на амортизацию оборудования, руб.;

$C_{\text{ЭН}}$ – затраты на энергию, необходимую для проведения НИР, руб.

При проведении НИР использовался пресс гидравлический.

Затраты на амортизацию гидравлического пресса ($A_{\text{пр}}$) равны:

$$A_{\text{пр}} = \text{стоимость пресса} \times (\text{число образцов} \times \text{продолжительность испытания}) /$$

$$/ \text{срок службы пресса}$$

Стоимость пресса в действующих ценах – 812 000 руб., срок службы – 15 000 часов, таким образом:

$$A_{\text{пр}} = 812\,000 \text{ руб.} \times (500 \times 0,1 \text{ ч}) / 15\,000 \text{ ч} = 2\,707 \text{ руб.}$$

При проведении НИР использовалась электрическая энергия ($C_{\text{ЭКС}}$) (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Расчёт затрат на электрическую энергию

Потребитель	Потребляемая мощность, кВт·ч	Фактическая продолжительность работы, ч	Тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч	Сумма затрат, руб.
Пресс гидравлический	1,0	50	3,26	163
Итого:				163

$$C_{\text{ЭКС}} = 2\,707 + 163 = 2\,870 \text{ руб.}$$

$C_{\text{НТ}}$ – затраты на научно-техническую информацию, руб.

$C_{\text{КОМ}}$ – расходы на командировки, связанные с выполнением, руб.;

$C_{\text{ПР}}$ – прочие прямые затраты (оплата консультаций, экспертиза патентного поиска и т. д.);

$C_{\text{НАК}}$ – накладные расходы (10 % от прямых затрат), руб.

Для составления сметы затрат по НИР проведём некоторые предварительные расчёты (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Смета затрат на проведение НИР

Наименование статьи затрат	Размер, руб.
1. Материалы основные, покупные комплектующие и изделия	0
2. Основная и дополнительная зарплата	248 800
3. Отчисления на социальные нужды	73 440
4. Затраты на эксплуатацию оборудования	2 870
5. Затраты на научно-техническую информацию	0
6. Расходы на командировки	0
Итого прямых расходов:	325 110
7. Прочие прямые расходы	0
Всего прямые расходы:	325 110
8. Накладные расходы (10 % от прямых затрат)	32 511
Итого:	357 621

Таким образом, $C_{\text{НИР}} = 357\,621$ рублей.

Расходы на приобретение оборудования представлены в таблице 5.4.

Амортизационные отчисления на полное восстановление нового оборудования рассчитываются по формуле 5.5.

$$A_{\text{обор}} = C_{\text{обор}} \times H_A / 100, \quad (5.5)$$

где $C_{\text{обор}}$ – затраты на приобретение нового оборудования, руб.

H_A – норма амортизации, руб.

$$A_{\text{обор}} = 606\,300 \times 20 / 100 = 121\,260 \text{ руб/г.}$$

Таблица 5.4 – Затраты на приобретение нового оборудования

Наименование оборудования	Количество, шт.	Цена, руб.	Сумма, руб.
Силос (12 тонн = 8 м ³)	1	290 000	290 000
Шнековый транспортер ES (диаметр 219 мм, длина 4 метра)	1	152 900	152 900
Дозатор ДВ-400 (объем 400 литров)	1	163 400	163 400
Итого:			606 300

Общие инвестиции по данному проекту будут проведены в первые три года реализации проекта, их величина поэлементно занесена в таблице 5.5. Расходы на НИР равномерно распределены в течение периода проведения научно-исследовательских работ.

Таблица 5.5 – Общие инвестиции, руб.

Элементы инвестиций	Годы проекта							
	1	2	3	4	5	6	7	Итого
1. Расходы на НИР	119 207	119 207	119 207	–	–	–	–	357 621
2. Приобретение оборудования			606 300	–	–	–	–	606 300
Итого:	119 207	119 207	725 507	–	–	–	–	963 921

Для оценки экономии материальных ресурсов был произведен расчет стоимости производства асфальтобетонной смеси III марки типа Б с использованием традиционных компонентов и с учетом применения золобитумного вяжущего.

В лаборатории был проведен подбор состава асфальтобетонной смеси (таблица 5.6, 5.7), на основании которого были составлены калькуляции на приготовление 1 т материала (таблица 5.8, 5.9). Для определения сметной стоимости была использована программа «Гранд – СМЕТА», а также нормативная литература [237–240].

Таблица 5.6 – Состав асфальтобетонной смеси III марки типа Б (вариант №1)

Наименование материалов	Поставщик/ удельный вес (т/м ³)	Состав смеси (битум сверх 100%)	Состав смеси (битум в 100%)
Щебень фракции 10-15 мм	Павловскгранит/ уд. вес 1,39 т/м ³	28,38	26,77
Щебень фракции 5-10 мм	Павловскгранит/ уд. вес 1,39 т/м ³	14,52	13,70
Песок из отсева дробления	Павловскгранит/ уд. вес 1,34 т/м ³	47,19	44,52
Порошок минеральный МП-1	ООО «Стромис»	9,91	9,35
Битум марки БНД-60/90	Московский НПЗ	6,00	5,66
ИТОГО:		106,00	100,00

Таблица 5.7 – Состав асфальтобетонной смеси III марки типа Б (вариант №2)

Наименование материалов	Поставщик/ удельный вес (т/м ³)	Состав смеси (битум сверх 100%)	Состав смеси (битум в 100%)
Щебень фракции 10-15 мм	Павловскгранит/ уд. вес 1,39 т/м ³	28,38	26,97
Щебень фракции 5-10 мм	Павловскгранит/ уд. вес 1,39 т/м ³	14,52	13,80
Песок из отсева дробления	Павловскгранит/ уд. вес 1,34 т/м ³	47,19	44,84
Порошок минеральный МП-1	ООО «Стромис»	9,14	8,69
Золобитумное вяжущее	-	6,00	5,7
ИТОГО:		105,23	100,00

Для расчета стоимости 1 т модифицированного битума была составлена калькуляция на его приготовление (таблица 5.10) на основании ГЭСН 81–02–27–

2001 [237], в ценах по состоянию на 2 квартал 2015 года. Все расчеты производились ресурсно-индексным методом на основании Методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации МДС 81–35 2004 г., а также на основании данных ОГКУ «Управление дорожного хозяйства и транспорта Белгородской области».

В расценках принят размер оплаты труда рабочих-строителей с учетом разрядности работ, исходя из среднемесячной зарплаты 20 000 руб. в месяц. При оплате труда рабочих, обслуживающих машины, учтена часовая тарифная ставка в размере 151,92 руб., что соответствует разряду 5.5, исходя из среднемесячной зарплаты 20 000 руб.

Сметные затраты стоимости 1 маш/часа эксплуатации строительных машин и механизмов включены согласно расчета сметных расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств в Белгородской области в редакции 2014 года, выданных «Управлением государственной экспертизы».

Стоимость материальных ресурсов определена на основании мониторинга цен на материалы» по прайс-листам заводов-изготовителей, действующих на текущий период и по сборникам ТЕР в Белгородской области с $K=5,4$ согласно протокола №1 об утверждении составляющих для расчета индексов удорожания стоимости СМР к ценам на 01.01.2000 г. по объектам, финансируемых из бюджетов всех уровней с 1 апреля 2014 г.

Автоперевозка материалов и погрузо-разгрузочные работы учтены по сборнику ТССЦпг 81–01–2001 на перевозку грузов для строительства в Белгородской области. $K=6,55$ на автотранспорт и $K=5,81$ на машины и механизмы, согласно вышеуказанному протоколу.

Накладные расходы и плановая прибыль определены согласно письма МРРРФ № 10753-ВТ/08 от 29.04.2011 года от фонда оплаты труда основных рабочих и рабочих-механизаторов. Для оценки полной стоимости работ за итогом расчетов учтены затраты, связанные с уплатой налога на добавленную стоимость 18% согласно Письма Минфина РФ от 8.12.2003 г. №04-03-11/103.

Таблица 5.8 – Калькуляция на приготовление 1 т асфальтобетонной смеси III марки типа Б (вариант №1)

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.						Т/з осн. раб.	Т/з мех.	
				на ед.	всего	на ед.	общая	В том числе						
								Осн.З/п	Эк.Маш.	З/пМех.	Мат			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Раздел 1.														
1	ГЭСН27-10-002-03	Приготовление асфальтобетонной смеси для горячей укладки типа Б плотной из фракционного щебня (гравия) с плотностью каменных материалов: 2,5-2,9 т/м3	100 т			0,01 1/100	210900,61	2109	25	486	17	1598	0,23	0,11
		Затраты труда рабочих (ср 3,3)	чел.час	22,75		0,23	112,08	25,78	25,78					
		Затраты труда машинистов	чел.час	11,43		0,11	151,92	16,71			16,71			
	1. 030101	Автопогрузчики 5 т	маш.час	3,91		0,04	493,12	19,72		19,72				
	2. 120651	Заводы асфальтобетонные с дистанционным управлением, производительность до 56 т/ч	маш.час	3,76		0,04	12402,78	496,11		496,11				
3	3. 101-1804	Порошок минеральный известковый МП-1 Стромис	т	9,35		0,0935	3465,06 (1600*1,15+163,33+0,66* 27)*0,66*1,6**1,02	323,98				323,98		
3	5. 101-1556	Битумы нефтяные дорожные марки БНД-60/90	т	5,66		0,0566	12453,84 (14000*1,15+33,47+311,7 7)*1,02	704,89				704,89		
3	7. 408-9131	Щебень из природного камня для строительных работ фракции 5-10 мм (Павловскгранит уд. вес 1,39 т/м3) 13,70/1,39	м3	9,86		0,0986	1144,31 (1279,6*1,15+4,66*6,51**1,39)*1,02	112,83				112,83		
3	9. 408-9132	Щебень из природного камня для строительных работ фракции 10-15 мм (Павловскгранит уд. вес 1,39 т/м3) 26,77/1,39	м3	19,26		0,1926	1144,31 (1279,6*1,15+4,66*6,51**1,39)*1,02	220,39				220,39		
3	11. 408-9135	Песок из отсева дробления (Павловскгранит уд. вес 1,34 т/м3) 44,52/1,34	м3	33,22		0,3322	709,78 (775,4*1,15+4,66*6,51**1,34)*1,02	235,79				235,79		
		Накладные расходы от ФОТ				66%		28						
		Сметная прибыль от ФОТ				40%		17						
		Всего с НР и СП						2154						
ИТОГИ ПО СМЕТЕ:														
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах								2109	25	486	17	1598	0,23	0,11
Накладные расходы								28						
Сметная прибыль								17						
Итого по смете:														
Итого								2154					0,23	0,11
НДС 18%								388						
ВСЕГО по смете								2542					0,23	0,11

Таблица 5.9 – Калькуляция на приготовление 1 т асфальтобетонной смеси III марки типа Б (вариант №2)

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.						Т/з осн. раб.	Т/з мех.
				на ед.	всего	на ед.	общая	В том числе					
								Осн.З/п	Эк.Маш.	З/пМех	Мат		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Раздел 1.													
1	ГЭСН27-10-002-03	Приготовление асфальтобетонной смеси для горячей укладки типа Б плотной из фракционного щебня (гравия) с плотностью каменных материалов: 2,5-2,9 т/м3	100 т		0,01 1/100	207528,4	2075	25	486	17	1564	0,23	0,11
		Затраты труда рабочих (ср 3,3)	чел.час	22,75	0,23	112,08	25,78	25,78					
		Затраты труда машинистов	чел.час	11,43	0,11	151,92	16,71			16,71			
	1. 030101	Автопогрузчики 5 т	маш.час	3,91	0,04	493,12	19,72		19,72				
	2. 120651	Заводы асфальтобетонные с дистанционным управлением, производительность до 56 т/ч	маш.час	3,76	0,04	12402,78	496,11		496,11				
3	3. 101-1804	Порошок минеральный известковый МП-1 Стромис	т	8,69	0,0869 (7500*1,18+(753,3 3+0,05*97)*0,55*1 5)*1,02	3465,06	301,11				301,11		
3	4. 101-9010	Битум модифицированный	т	5,7	0,057 5)*1,02	12104	689,93				689,93		
3	5. 408-9131	Щебень из природного камня для строительных работ фракции 5-10 мм (Павловскгранит уд. вес 1,39 т/м3) 13,80/1,39	м3	9,93	0,0993 (1270,5*1,18+4,05 5,81*1,30)*1,02	1144,31	113,63				113,63		
3	6. 408-9132	Щебень из природного камня для строительных работ фракции 10-15 мм (Павловскгранит уд. вес 1,39 т/м3) 26,97/1,39	м3	19,4	0,194 (1270,5*1,18+4,05 5,81*1,30)*1,02	1144,31	222				222		
3	7. 408-9135	Песок из отсева дробения (Павловскгранит уд. вес 1,34 т/м3) 44,84/1,34	м3	33,46	0,3346 (778,4*1,18+4,05* 5,81*1,34)*1,02	709,78	237,49				237,49		
		Накладные расходы от ФОТ			56%=66%*0,85		24						
		Сметная прибыль от ФОТ			32%=40%*0,8		13						
		Всего с НР и СП					2112						
ИТОГИ ПО СМЕТЕ:													
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах							2075	25	486	17	1564	0,23	0,11
Накладные расходы							24						
Сметная прибыль							13						
Итого по смете:													
Итого							2112					0,23	0,11
НДС 18%							380						
ВСЕГО по смете							2492					0,23	0,11

Таблица 5.10 – Калькуляция на приготовление 1 т модифицированного битума

№ пп	Обосновани е	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.						Т/з осн. раб.	Т/з мех.
				на ед.	всего	на ед.	общая	В том числе					
								Осн.З/п	Эк.Маш.	З/пМех	Мат		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Раздел 1.													
1	ГЭСН27-10-001-03 прим	Приготовление битума с введением добавок в котлах емкостью 15000 л: вязкого	1 т битума и битумных эмульсий		1	11737,61	11738	142	845	204	10751	1,22	1,34
		Затраты труда рабочих (ср 3,6)	чел.час	1,22	1,22	116,22	141,79	141,79					
		Затраты труда машинистов	чел.час	1,34	1,34	151,92	203,57			203,57			
	1. 121001	Котлы битумные стационарные 15000 л	маш.час	0,72	0,72	971,95	699,8		699,8				
	2. 122102	Установки для приготовления поверхностно-активных добавок	маш.час	0,31	0,31	467,78	145,01		145,01				
3	3. 101-9010	Битум	т	0,85	0,85	12453,84 (14000/1,18+33,47+311,77)*1,02	10585,76				10585,76		
3	4. 101-9723	Добавки сухие (цемент, известь, золы уноса сухого отброса и др.)	т	0,15	0,15	1101,69 1300/1,18	165,25				165,25		
		Накладные расходы от ФОТ			66%		228						
		Сметная прибыль от ФОТ			40%		138						
		Всего с НР и СП					12104						
ИТОГИ ПО СМЕТЕ:													
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах							11738	142	845	204	10751	1,22	1,34
Накладные расходы							228						
Сметная прибыль							138						
ВСЕГО по смете							12104					1,22	1,34

Экономия от использования асфальтобетонной смеси № 2 составляет:

$$\Delta C = 2\,542 - 2\,492 = 50 \text{ руб./т.}$$

Для расчёта экономии на всю дорогу необходимо учесть следующие данные:

- количество полос движения – 2;
- ширина полосы движения – 3,0 м;
- ширина обочины, устроенной по типу дорожной одежды – 0,5 м;
- общая ширина покрытия – 7 м;
- протяженность трассы – 20 км;
- потребность асфальтобетонной смеси для устройства 1 м² покрытия толщиной 6 см – 0,145 т.

$$V = 7 \times 20\,000 \times 0,145 = 20\,300 \text{ т.}$$

Экономия сметной стоимости при укладке в качестве слоя покрытия асфальтобетонной смеси № 2 на всю дорогу составит:

$$\Delta C = 20\,300 \times 50,0 = 1\,015\,000 \text{ руб.}$$

Расчет жизненного цикла проекта был произведен с условием, что ежегодно в период с 2015 по 2019 объемы выполняемых работ будут идентичны.

Налог на прибыль, необходимый к уплате за год, определяется по формуле 5.6:

$$H_{\Pi} = (\Delta C - \Delta A) \times 0,20 \quad (5.6)$$

$$H_{\Pi} = (1\,015\,000 - 121\,260) \times 0,20 = 178\,748 \text{ руб.}$$

При оценке инвестиционных проектов анализировались связанные с ними денежные потоки, так как эффективность того или иного инвестиционного решения нельзя оценить, не зная, как распределяются капиталовложения, и доходы во времени. Денежные потоки наличности содержат сводные данные об объемах работ, инвестициях, производственных и финансовых издержках по каждому году осуществления проекта, образуя соответствующие потоки данных.

Для объективной оценки эффективности проекта был составлен план денежных потоков в соответствии с графиком реализации проекта. План денежных

потоков является одним из основных документов, предназначенных для определения потребности в капитале, выработки стратегии финансирования предприятия, а также для оценки эффективности его использования.

Результаты предварительно выполненных расчетов приведены в таблице 5.11, где все показатели отражены по каждому году.

Чистый денежный поток ЧДП:

$$\text{ЧДП} = \text{ДП} - \text{ДО} + \Delta A, \quad (5.7)$$

где ДП – приток наличностей, руб.;

ДО – отток наличностей, руб.;

ΔA – амортизация основных фондов.

Денежные средства, поступающие и расходуемые в разные периоды времени, неравнозначны и требуют их приведения к какому-либо одному моменту – точке приведения.

За точку приведения был принят первый шаг расчета, для которого коэффициент равен 1. Приведение же последующих потоков денежных средств (относящихся ко 2, 3... t-му году) к данному моменту времени осуществлялось с помощью коэффициента дисконтирования, рассчитываемого по формуле 5.8.

$$D_t = \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (5.8)$$

где r – норма или ставка дисконтирования, $r = 15\%$;

t – номер года, притоки и оттоки которого приводятся к первому году, т. е. дисконтируются.

Чистая текущая дисконтированная стоимость (NPV) характеризует общий абсолютный результат инвестиционной деятельности и определяется как разность денежных притоков и оттоков, разновременные величины которых приводятся в сопоставимый вид путем приведения к первому году осуществления проекта, то есть умножения на соответствующий коэффициент дисконтирования. Значения NPV, полученные по каждому году функционирования проекта, суммируются, образуя NPV проекта:

$$\text{NPV}_{\text{проекта}} = \text{NPV}_1 + \text{NPV}_2 + \text{NPV}_3 + \dots + \text{NPV}_n = \sum \text{NPV}_i, \quad (5.9)$$

где n – количество лет функционирования проекта,

$$NPV_i = ЧДП_i \times D_i, \quad (5.10)$$

где $ЧДП_i$ – чистый денежный поток i -года

D_i – коэффициент дисконтирования i -года.

Таблица 5.11 – План денежных потоков, тыс. рублей

Денежные потоки	Жизненный цикл проекта						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1. Приток наличностей:				1 015	1 015	1 015	1 015
1.1 Экономия материалов				1 015	1 015	1 015	1 015
2. Отток наличностей	– 119	– 119	– 725	– 300	– 300	– 300	– 300
2.1 Расходы на НИР	119	119	119				
2.2 Приобретение оборудования			606				
2.3 Амортизация ОПФ				121	121	121	121
2.4 Налог на прибыль				179	179	179	179
3. Чистый денежный поток	– 119	– 119	– 725	836	836	836	836
4. Коэффициент дисконтирования	1	0,87	0,756	0,658	0,572	0,497	0,432
5. Чистая текущая дисконтированная стоимость	– 119	– 104	– 548	550	478	415	361
6. Чистая текущая дисконтированная стоимость нарастающим итогом	– 119	– 223	– 771	– 221	257	672	1 033

$$NPV_{\text{проекта}} = -119 - 104 - 548 + 550 + 478 + 415 + 361 = 1\,033 \text{ тыс. руб.};$$

$NPV > 0$ – проект эффективен.

Индекс рентабельности (PI) является относительной величиной, используемой при расчёте чистой текущей дисконтированной стоимости. Если инвестиции представляют собой некоторый поток, то формула имеет вид:

$$PI = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{P_k}{(1+r)^k}}{\sum_{j=1}^m \frac{K_j}{(1+i)^j}} \quad (5.11)$$

где K_j – размер инвестиционных затрат в периоды,

$$PI = \frac{550 + 478 + 415 + 361}{119 + 104 + 548} = 2,34$$

Исходя из практики принятия решений, если $PI > 1$, то проект следует считать эффективным.

В качестве важных показателей в оценке эффективности проекта также можно выделить: период возврата инвестиций и период окупаемости проекта.

Период возврата инвестиций:

$$T_{\text{воз}} = t_x + \frac{|NPV_t|}{\text{ДДП}_{t+1}}, \quad (5.12)$$

где t_x – количество лет с отрицательным эффектом в дисконтированном денежном потоке нарастающим итогом;

NPV_t – NPV имеющее последний отрицательный эффект в году t_x ;

ДДП_{t+1} – дисконтированный денежный поток без нарастающего эффекта в году $(t+1)$.

$$T_{\text{воз}} = 4 + \frac{221}{478} = 4,46 \text{ года},$$

Период окупаемости проекта:

$$T_{\text{ок}} = T_{\text{воз}} - T_{\text{ин}}, \quad (5.13)$$

где $T_{\text{ин}}$ – период вложения инвестиций, лет;

$$T_{\text{ок}} = 4,46 - 3 = 1,46 \text{ года}.$$

Финансовый профиль проекта представлен на рисунке 5.5.

С помощью финансового профиля получают наглядную графическую интерпретацию следующие обобщающие показатели:

- максимальный денежный отток – K_{MAX} ;
- интегральный экономический эффект – $NPV_{\text{ПР}}$;
- период возврата инвестиций – $T_{\text{ВОЗ}}$;
- период окупаемости проекта – $T_{\text{ОК}}$.

Рассчитанные показатели говорят об экономической целесообразности проекта по использованию асфальтобетона на основе золобитумного вяжущего, так как $NPV_{\text{ПР}} = 1\,033$ тыс. руб. > 0 ; $PI = 2,34 > 1$; $T_{\text{ВОЗ}} = 4,46$ года $< T_{\text{ПР}}$.

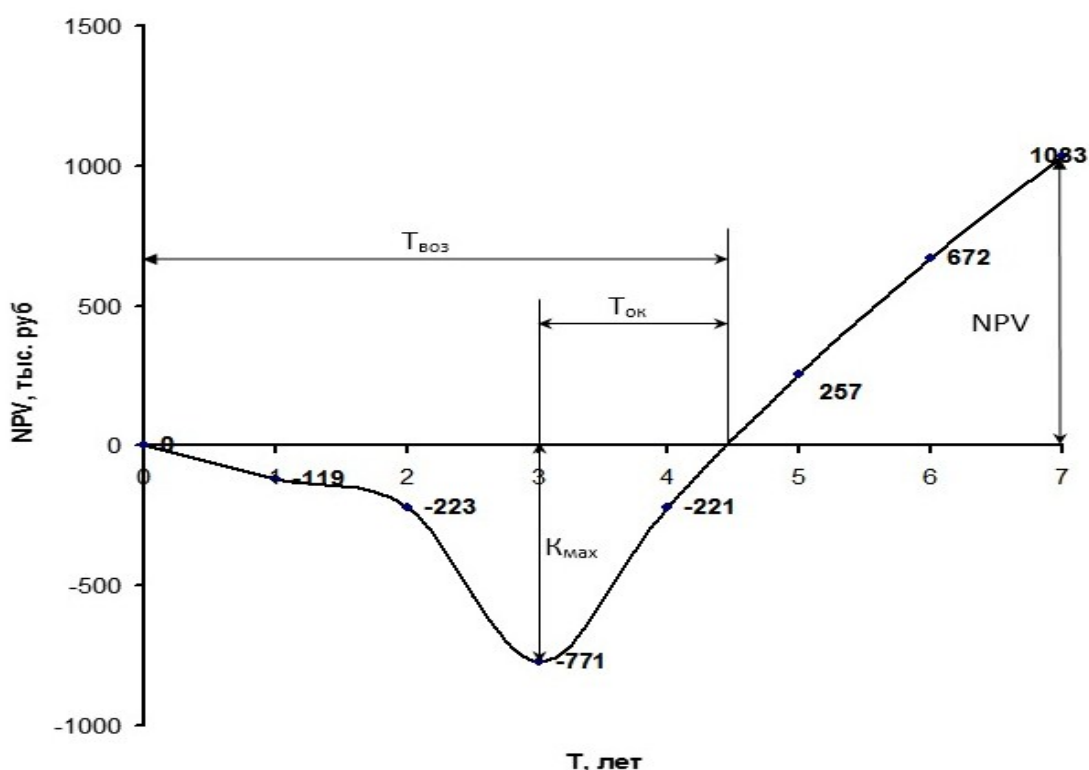


Рисунок 5.5 – Финансовый профиль проекта

Таким образом, снижение затрат при устройстве покрытия дорожной одежды из асфальтобетона на основе золобитумного вяжущего по сравнению с традиционными конструкциями составляет 50 руб./т в ценах II квартала 2015 года. Динамический метод расчета показал, что затраты на внедрение разработанного материала для строительства оснований дорожных одежд при производстве 20 км в год окупаются в течение 1,46 года за счет меньшего потребления традиционного вяжущего – битума по сравнению с покрытием дорожной одежды из традиционных материалов, без снижения прочностных показателей.

5.3. Внедрение результатов исследований

Для внедрения результатов работы при строительстве, ремонте и реконструкции автомобильных дорог разработаны следующие технические документы:

- рекомендации по применению зол-уноса различного состава в качестве добавок, структурирующих битум (см. приложение 2);
- стандарты организации: СТО 2066339-023-2014 «Золобитумное вяжущее с использованием зол-уноса ТЭС» (см. приложение 3), СТО 2066339-024-2014 «Асфальтобетон на основе золобитумного вяжущего» (см. приложение 4);
- технологический регламент на производство асфальтобетонов с использованием золобитумных вяжущих (см. приложение 5).

Апробация производства золобитумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе проводилась в промышленных условиях на базе предприятия ООО «Мостдорстрой».

С учетом разработанного способа получения асфальтобетонных смесей на основе золобитумных вяжущих подготовлен протокол о намерениях внедрения данных материалов в рамках областной программы по строительству автомобильных дорог (см. приложение 6).

Разработанные материалы использованы для устройства верхнего слоя покрытия при капитальном ремонте участка автомобильной дороги III категории в Белгородском районе (см. приложение 7).

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» профилю подготовки «Автомобильные дороги и аэродромы»; магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» профилей подготовки «Дорожно-строительное материаловедение», «Автомобильные дороги», «Материаловедение и технология материалов» (см. приложение 8).

5.4. Выводы

1. Для практической реализации результатов работы представлена технологическая схема производства асфальтобетонов на основе золобитумных вяжущих. Процесс производства позволяет, не переоборудуя асфальтобетонный завод, получать асфальтобетонную смесь на основе модифицированного битума.

2. Экономическая эффективность применения золобитумного вяжущего обусловлена повышением эксплуатационных характеристик асфальтобетона на его основе без удорожания материальных затрат. Стоимость золобитумного вяжущего при повышении его марки с 60/90 до 40/60 на 2 % ниже стоимости исходного битума.

3. Применение разработанного материала позволит решить экологическую проблему, за счет использования отходов, находящихся в отвалах ТЭС, а также снизит затраты на хранение вышеуказанных материалов, освобождая занятые земли под хозяйственные нужды.

4. Для внедрения результатов работы разработан ряд технических документов. Апробация производства золобитумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе проводилась в промышленных условиях на базе предприятия ООО «Мостдорстрой». Разработанные материалы использованы для устройства верхнего слоя покрытия при капитальном ремонте участка автомобильной дороги III категории в Белгородском районе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

Предложен принцип проектирования золобитумного вяжущего для асфальтобетонов с использованием высокодисперсных алюмосиликатных отходов ТЭС – зол-уноса различного состава, заключающийся в оценке химико-минеральных и морфоструктурных особенностей зол-уноса, а так-же реотехнологических свойств золобитумного вяжущего по методу Superpave в измерительной системе пластина/пластина (PP) в диапазоне температур от 46 до 76 °С с приложением осциллирующей нагрузки при определении структурирующей способности алюмосиликатных модификаторов по отношению к битуму.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования зол-уноса ТЭС в качестве структурирующей добавки к битуму при производстве асфальтобетона. Показано, что структурирующая роль зол-уноса, обусловленная видом и технологией сжигания топлива, а также удаления зольных отходов, заключается в интенсификации процессов хемосорбции в результате взаимодействия компонентов битума с поверхностью алюмосиликатного модификатора за счет особенностей его химико-минерального состава и физической адсорбции, обусловленной морфоструктурными особенностями. Это в совокупности позволяет повысить физико-механические и вязкоупругие свойства битума.

Установлен характер влияния зол-уноса на реотехнологические и физико-механические свойства золобитумного вяжущего в зависимости от их состава. Использование полидисперсного алюмосиликатного модификатора в качестве структурирующего компонента приводит к оптимизации структуры вяжущего, расширению диапазона эксплуатационных температур, росту устойчивости к напряжениям сдвига и температуры размягчения, снижению пенетрации и дуктильности при нормируемых температурах. Применение золобитумного вяжущего позволяет повысить теплостойкость асфальтобетона и его деформативную устойчивость при эксплуатации в летний период.

Произведено ранжирование зол-уноса различного состава по степени эффективности их использования в качестве модифицирующих агентов битума по физико-химическим и технологическим критериям. По совокупности факторов установлена следующая последовательность повышения структурирующей роли зол-уноса проанализированных видов: WE Energies (низкокальцевая) → Новотроицкой ТЭС (низкокальцевая) → Троицкой ГРЭС (низкокальцевая) → Рефтинской ГРЭС (низкокальцевая) → Columbia Energy Center (высококальцевая) → Назаровской ТЭС (высококальцевая).

Предложены составы асфальтобетонных смесей на основе золобитумных вяжущих, позволяющие производить асфальтобетоны типа Б с прочностью при сжатии при температуре 50, 20 и 0 °С – 2,2–2,9 МПа, 4,4–6,2 МПа и 9,7–9,9 МПа соответственно; сдвигоустойчивостью по коэффициенту внутреннего трения – 0,85–0,91, по сцеплению при сдвиге при температуре 50 °С – 0,62–0,86; трещиностойкостью – 4,0–4,3 МПа; водостойкостью – 0,89–0,98; водонасыщением – 1,52–1,75 % и водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,77–0,90.

Предложена технология производства асфальтобетона на основе золобитумного вяжущего. С целью внедрения полученных результатов исследования разработаны следующие нормативные документы: Рекомендации по применению зол-уноса различного состава в качестве добавок, структурирующих битум; Технологический регламент на производство асфальтобетонов с использованием золобитумных вяжущих; стандарты организаций, отражающие технические характеристики готовых материалов.

Исследования битумоминеральных композитов проводились с использованием лабораторного оборудования на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Апробация технологии получения золобитумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе осуществлялась в промышленных условиях на базе предприятия ООО «Мостдорстрой». Разработанные материалы были применены при устройстве верхнего слоя покрытия в процессе капитального ремонта участка автомобильной дороги III технической категории «Крым – Октябрьский – Бессоновка» Белгородского района протяженностью 0,8 км. Внедрение результатов диссертационной работы

в учебный процесс осуществляется при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Экономическая эффективность применения алюмосиликатного техногенного сырья и производства битумоминеральных композитов с его использованием, обеспечивается в результате применения доступного сырья, снижения стоимости вяжущего, повышения технико-эксплуатационных показателей дорожно-строительных материалов.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для внедрения на асфальтобетонных заводах в различных регионах РФ; при подготовке бакалавров и магистров направлений «Строительство», «Материаловедение и технология материалов».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

- изучение структурных изменений в бинарной системе «битум – зола-уноса» и влияния зол-уноса ТЭС на изменение группового состава применяемого битума;
- исследование изменения физико-механических характеристик и структурных особенностей асфальтобетонов при длительной эксплуатации в период знакопеременных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Столяров, В.В.* Оптимизация числа полос движения на сети дорог национального и регионального значения на основе требуемого уровня надежности сети / В.В. Столяров, Д.М. Немчинов // *Строительные материалы*. – 2014. – № 11. – С. 3–7.
2. Концепция национальной программы модернизации и развития автомобильных дорог Российской Федерации до 2025 года. – М.: Министерство транспорта, ГСДХ, 2003. – 33 с.
3. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010–2015)» Подпрограмма «Автомобильные дороги». – М.: Министерство образования РФ, 2008. – 139 с.
4. *Ушаков, В.В.* Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве // *Наука и техника в дор. отрасли*. – 2002. – № 4.
5. Ремонт асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Обзорная информация // *Автомобильные дороги и мосты*. – 2004. – № 5. – 37 с.
6. *Левитин, И.Е.* Повышение эффективности строительства и эксплуатации автомобильных дорог // *Совещание по вопросу повышения эффективности строительства и эксплуатации автомобильных дорог*. – М. – 30.05.2011.
7. Дорожное строительство в России – реалии, проблемы и перспективы отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vik95.ru/news/1/89.html> (Дата обращения: 15.03.2015).
8. *Леонович, И.И.* Диагностика и управление качеством автомобильных дорог: учеб. пособие / И.И. Леонович, С.В. Богданович, И.В. Нестерович. – Минск: Новое знание, 2011. – 350 с.
9. *Носов, В.П.* Увеличение сроков службы дорожных одежд – стратегическая задача дорожной науки // *Автомобильные дороги*. – 2006. – № 12. – С. 81–86.
10. *Гридчин, А.М.* Оценка воздействия климатических факторов на асфальтобетон / А.М. Гридчин, Г.С. Духовный, А.Н. Котухов, А.С. Погромский // *Вестник*

Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2003. – № 5. – С. 262.

11. *Волков, М.И.* Дорожно-строительные материалы / М.И. Волков, И.М. Борщ, И.М. Грушко, И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1975. – 527 с.

12. *Веренько, В.А.* Деформации и разрушения дорожных покрытий: причины и пути устранения / В.А. Веренько. – Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2008. – 304 с.

13. *Поздняева, Л.В.* Ловушка для трещин / Л.В. Поздняева, Л.А. Горельшева // Автомобильные дороги. – 2010. – № 8. – С. 78–81.

14. *Грушко, И.М.* Дорожно-строительные материалы: учебник для автомобильно-дорожных институтов / И.М. Грушко, И.В. Королев, И.М. Борщ, Г.М. Мищенко. – М.: Транспорт, 1983. – 383 с.

15. *Котлярский, Э.В.* Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона: учебное пособие / Э.В. Котлярский. – М.: МАДИ (ГТУ), 2004. – 192 с.

16. *Рыбьев, И.А.* Асфальтовые бетоны / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1969. – 396 с.

17. *Рыбьев, И.А.* Строительное материаловедение / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.

18. *Горчаков, Г.И.* Строительные материалы: учеб. для вузов / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.

19. *Баженов Ю.М.* Технология бетона: учебное пособие для технологических и специальных строительных вузов / Ю.М. Баженов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с.

20. *Буртан, С.Т.* Состав и свойства минерального остова в связи с проблемой управления качеством асфальтобетона / С.Т. Буртан, С.К. Мустафин // Дорожная техника. – 2010. – С. 20–27.

21. *Гридчин, А.М.* Асфальтобетон с использованием гидравлически активных минеральных порошков: учебное пособие / А.М. Гридчин, В.В. Ядыкина, М.А. Высоцкая, Д.А. Кузнецов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. – 163 с.

22. ГОСТ 8267–93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – Введ. 01.01.1995. – М: Изд-во стандартов, 1995. – 12 с.

23. ГОСТ 8269.0–97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – Введ. 01.07.1998. – М: Изд-во стандартов, 1998. – 61 с.

24. ГОСТ 9128–2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальто-бетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. – Введ. 01.11.2014. – М: Изд-во стандартов, 2014. – 55 с.

25. *Гезенцевей, Л.Б.* Технология производства асфальтового бетона / Л.Б. Гезенцевей. – М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1955. – 326 с.

26. *Вайсберг, Л.А.* Технологии производства высококачественного щебня / Л.А. Вайсберг, А.Д. Шулюяков // Дорожная техника. – 2004. – С. 7–9.

27. *Подрез, Г.А.* Применение местных эффузивных горных пород для производства асфальтобетонов / Г.А. Подрез, А.В. Битуев, М.Е. Заяханов, А.Н. Мангутов, В.С. Прокопец // Строительные материалы. – 2009. – №5. – С. 36–38.

28. *Губач, Л.С.* Дорожные покрытия из керамзитасфальтобетона / Л.С. Губач, В.Д. Галдина, С.Г. Пономарева // Автомобильные дороги. – 1980. – №6. – С. 9–10.

29. *Прокопец, В.С.* Асфальтобетоны на основе пористых заполнителей Западной и Восточной Сибири / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.А. Подрез // Строительные материалы. – 2009. – №11. – С. 26–28.

30. *Лесовик, В.С.* Состояние и перспективы использования техногенного сырья / В.С. Лесовик // Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов: сб. докл. – Белгород, 2014. – С. 17–21.

31. Мелкозернистые дорожные бетоны с наполнителями из техногенного сырья КМА: монография / Гридчин А.М., Ядыкина В.В., Лесовик Р.В., Гричанников В.А. – Белгород, 2006. – 123 с.

32. Ядыкина, В.В. Кварцитопесчаники КМА как минеральная составляющая асфальтобетонной смеси / В.В. Ядыкина, Д.А. Кузнецов // Строительные материалы. – 2003. – №1. – С. 20–21.

33. Дворкин, Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности: учебно-справочное пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 368 с.

34. Гридчин, А.М. Повышение эффективности дорожного строительства путем использования анизотропного сырья: учебное пособие / А.М. Гридчин. – Москва: Изд-во АСВ, 2006. – 485 с.

35. Подольский, В.П. Опыт использования электросталеплавильных шлаков в составе минеральной части асфальтобетонов / В.П. Подольский, Г.С. Духовный, А.С. Погромский // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Дорожно-транспортное строительство. – 2004. – № 2. – С. 136–138.

36. Рахимбаев, Ш.М. К вопросу о фазовом составе и рациональном применении саморассыпающихся сталеплавильных шлаков / Ш.М. Рахимбаев, А.С. Погромский, Г.С. Духовный, Т.В. Аниканова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2008. – № 1. – С. 49–52.

37. Джулаи, Л.И. Некоторые особенности технологии приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей на фосфорных шлаках / Л.И. Джулаи // Асфальтобетон с использованием местных материалов и побочных продуктов промышленности: тр. СоюзДорНИИ. Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт; отв. ред. И.А. Плотникова. – 1984. – С. 22–29.

38. Скорилов, С.В. Физико-механические и технологические свойства цветных дорожных покрытий на основе эмульгированных вяжущих / С.В. Скорилов,

Б.Г. Печеный, В.А. Бородина // Строительные материалы. – 2009. – № 5. – С. 39–41.

39. Пат. 2380331 РФ, МПК(2006) С04 В26/26. Асфальтобетонная смесь / Коробейников А.П., Филин А.Н., Барыльников В.В., Осокин Е.А., Усов М.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2008128754/03; заявл. 14.07.2008; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3. – 5 с.

40. *Лесовик, Р.В.* Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Лесовик Руслан Валерьевич. – Белгород, 2008. – 40 с.

41. *Агейкин, В.Н.* Исследование влияния вспученного вермикулитового песка на свойства битумных композиций и асфальтобетона / В.Н. Агейкин, Л.Е. Свинтицких, Т.Н. Шабанов, А.А. Ключов // Строительные материалы. – 2003. – № 6. – С. 40–42.

42. *Шлегель, И.Ф.* Перспективы производства и применения легкого пористого заполнителя / И.Ф. Шлегель, Г.Я. Шаевич, Л.А. Карабут, В.М. Тонких, А.В. Носков, А.Г. Шишкин, Е.Б. Пашкова // Строительные материалы. – 2005. – №7. – С. 27–29.

43. *Борисенко, Ю.Г.* Особенности структуры легких асфальтобетонов / Ю.Г. Борисенко, О.А. Борисенко // Строительные материалы. – 2007. – № 10. – С. 64–65.

44. *Борисенко, Ю.Г.* Термостабильность легких битумно-минеральных композиций / Ю.Г. Борисенко, О.А. Борисенко, А.А. Солдатов // Строительные материалы. – 2009. – № 7. – С. 10–11.

45. *Сахаров, П.В.* Способы проектирования асфальтобетонных смесей / П.В. Сахаров // Транспорт и дороги города. – 1935. – № 12. – С. 22–26.

46. ГОСТ Р 52129–2003 Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. – Введ. 27.06.2003. – М: Изд-во стандартов, 2003. – 22 с.

47. *Лютенко, А.О.* Анализ микроструктуры алюмосиликатного сырья с позиции применения его в дорожном строительстве / А.О. Лютенко, В.В. Строкова, М.С. Лебедев, Т.В. Дмитриева, М.А. Николаенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 33–38.

48. *Stroкова, V.V.* Road soil-concretes on the basis of clay rocks / V.V. Stroкова, M.S. Lebedev, T.V. Dmitrieva, A.O. Lyutenko // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Т. 24. – № 10. – С. 1316–1321.

49. *Лютенко, А.О.* Анализ отходов горной добычи как потенциального источника сырья для производства дорожно-строительных материалов / А.О. Лютенко, М.С. Лебедев, В.В. Строкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-2 (50). – С. 445–449.

50. *Лесовик, В.С.* Минеральные порошки из горных пород кислого состава / В.С. Лесовик, В.С. Прокопец, П.А. Болдырев // Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 44–46.

51. Обзор технологий производства асфальтобетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=7574 (Дата обращения: 15.01.2014).

52. ГОСТ 22245–90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. – Введ. 01.01.1991. – М: Изд-во стандартов, 1991. – 9 с.

53. *Худякова, Т.С.* О нормативных требованиях к дорожному битуму как материалу целевого назначения / Т.С. Худякова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – №40. – С. 40–43.

54. *Илиополов, С.К.* Органические вяжущие для дорожного строительства: учебное пособие / С.К. Илиополов, И.В. Мардиросова, Е.В. Углова, О.К. Безродный. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Юг», 2003. – 428 с.

55. *Гезенцвей, Л.Б.* Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцвей, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.

56. Колбановская, А.С. Дорожные битумы / А.С. Колбановская, В.В. Михайлов. – М.: Транспорт, 1973. – 264с.
57. Битум [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%C1%E8%F2%F3%EC> (Дата обращения: 15.01.2015).
58. Амино, Ш.Х. Применение специальных модификаторов и присадок к дорожным битумам и влияние их на свойства асфальтобетона / Ш.Х. Амино, Э.Г. Теляшев, Ю.А. Кутын // Башкирский химический журнал. – 2011. – Том 8. – №4. – С.
59. Галдина, В.Д. Дорожные битумы из тяжелой Западно-Казахстанской нефти / В.Д. Галдина // Вестник СибАДИ. – 2009. – Выпуск 4(14). – С. 22–27.
60. Синьшинов, Д.А. Использование гранулированной серы в качестве модифицирующей добавки к битуму / Д.А. Синьшинов, П.А. Синьшинов, Е.В. Подоплелов // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 027.
61. Худякова, Т.С. Модификация битума / Т.С. Худякова, Р.М. Смирнов, Л.В. Колеров, В.А. Жигадло, Л.М. Гохман, С.И. Дубина, Т. Фальво // Дорожная держава. – 2010. – № 25. – С. 66–71.
62. Hidayah, N. What are the Types of Modifier in Bitumen? / N. Hidayah // Highway Engineering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.engineeringcivil.com/what-are-the-types-of-modifier-in-bitumen.html> (Дата обращения: 16.01.2015).
63. Хойберг, А.Д. Битумные материалы (асфальты, смолы, пеки) / А.Д. Хойберг. – М.: Химия, 1974. – 248с.
64. Кучма, М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве / М.И. Кучма. – М.: Транспорт, 1980. – 191с.
65. Королёва, И.В. Технические поверхностно-активные вещества из вторичных ресурсов в дорожном строительстве / И.В. Королёва. – М.: Транспорт, 1991. – 144с.

66. *Гохман, Л.М.* Комплексные органические вяжущие материалы на основе блоксополимеров типа СБС: учебн. пособие / Л.М. Гохман. – М.: ЗАО «ЭКОН-ИНФОРМ», 2004. – 510 с.

67. *Соломенцев, А.Б.* Классификация и номенклатура модифицирующих добавок для битумов / А.Б. Соломенцев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – № 1. – С. 14–16.

68. *Тарасов, Р.В.* Модификация битумов полимерами / Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова, А.А. Кадомцева // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34687> (Дата обращения: 10.12.2014).

69. *Илиополов, С.К.* Модифицированное вяжущее для шероховатых тонкослойных покрытий / С.К. Илиополов, О.А. Балабанов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. – № 34. – С. 25–28.

70. *Рукавишников, В.К.* Внедрение полимерно-битумных вяжущих на объектах «Северавтодора» / В.К. Рукавишников, Р.В. Чистяков, С.В. Рыжков, Ф.И. Фахрутдинов, В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.И. Надыкто // Повышение качества материалов дорожного и строительного назначения: сб. науч. тр. Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – 223 с.

71. *Киселев, В.П.* Смолы пиролиза древесины как сырье для модификации битума / В.П. Киселев, А.В. Иванченко, А.А. Ефремов // Химия растительного сырья. – 2001. – № 4. – С. 111–113.

72. *Киселев, В.П.* Использование отстойной смолы пиролиза скорлупы кедровых орехов в качестве модификатора органического вяжущего / В.П. Киселев, А.Ю. Грибов, А.А. Ефремов // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 65–69.

73. *Прошин, А.П.* Структура и свойства модифицированного серного вяжущего / А.П. Прошин, Е.В. Королев, Е.Г. Калинин // Строительные материалы. – 2005. – № 7. – С. 6–10.

74. Приготовление и применение полимерно-битумного вяжущего. Тематическая подборка. Москва 1997. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/prigotovlenieiprimeneniep.html> (Дата обращения: 20.01.2015).

75. *Высоцкая, М.А.* Полимермодифицированные материалы для дорожно-строительной отрасли / М.А. Высоцкая, Д.А. Кузнецов, С.Ю. Русина, И.С. Радченко, Д.Е. Барабаш // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений: сб. междунар. конф. – Белгород, 2013. – С. 91–95.

76. *Готовцев, В.М.* Нанотехнологии в производстве асфальтобетона / В.М. Готовцев, А.Г. Шатунов, А.Н. Румянцев, В.Д. Сухов // Фундаментальные исследования. – 2013. – №1. – С. 191–195.

77. *Беляев, П.С.* Исследование влияния резиновой крошки на физико-механические показатели нефтяного битума в процессе его модификации / П.С. Беляев, М.В. Забавников, О.Г. Маликов, Д.С. Волков // Вестник ТГТУ. – 2005. – Том 11. – №4. – С. 923–930.

78. *Карпенко, А.В.* Резинобитумное вяжущее, основные показатели и перспективы использования / А.В. Карпенко, Г.С. Духовный, С.И. Мирошниченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 22–24.

79. *Сачкова, А.В.* Получение колеестойкого асфальтобетона с применением композиционного резинобитумного вяжущего / А.В. Сачкова, Г.С. Духовный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 49–51.

80. *Духовный, Г.С.* Эффективность применения резинобитумного вяжущего при устройстве асфальтобетонных покрытий / Г.С. Духовный, А.В. Сачкова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2 (34). – С. 19–23.

81. *Королев, И.В.* Пути экономии битума в дорожном строительстве / И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1986. – 149 с.

82. *Королев, Е.В.* Моделирование битумной композиции со структурными единицами нанометрических размеров / Е.В. Королев, Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова, С.С. Иноземцев, В.А. Смирнов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – С. 26–33.

83. *Королев, Е.В.* Техничко-экономическая эффективность применения сероасфальтобетонов / Е.В. Королев, В.А. Гладких // Вестник МГСУ. – № 4. – 2013. – С. 76–83.

84. *Барабаш, Д.Е.* Модифицированные серобетоны в аэродромном и дорожном строительстве / Д.Е. Барабаш, А.В. Шубин, Д.А. Паршин, А.Н. Шубин // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений: сб. междунар. науч.-практ. конф. – Белгород. – 2013. – С. 34–38.

85. *Руденская, И.М.* Органические вяжущие для дорожного строительства / И.М. Руденская, А.В. Руденский. – М.: Транспорт, 1984. – 229 с.

86. *Высоцкая, М.А.* Наноструктурированное полимерно-битумное вяжущее для дорожно-строительной индустрии / М.А. Высоцкая, Д.А. Кузнецов, С.Ю. Русина // Инновации в науке: материалы XIII международной заочной научно-практической конференции (17 октября 2012 г.). – № 13-1. – С. 23–28.

87. *Лесовик, В.С.* Нанотехнологии в дорожно-строительной индустрии / В.С. Лесовик, М.А. Высоцкая, В.В. Ядыкина, Д.А. Кузнецов // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 52–54.

88. *Лесовик, В.С.* Нанотехнологии в дорожно-строительной индустрии / Лесовик В.С., Высоцкая М.А., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А. // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 52–54.

89. *Высоцкая, М.А.* Наноструктурированные дорожно-строительные материалы на основе органических вяжущих / М.А. Высоцкая, Д.А. Кузнецов, Д.Е. Барабаш // Строительные материалы. – 2013. – № 12. – С. 63–64.

90. *Высоцкая, М.А.* Дорожно-строительные материалы на основе модифицированных органических вяжущих / М.А. Высоцкая, С.Ю. Русина, Д.А. Кузнецов, Д.Е. Барабаш // Мир дорог. – 2014. – № 78. – С. 53–54.

91. *Yazdani, A.* Optimization of Asphalt Binder Modified with PP/SBS/Nanoclay Nanocomposite using Taguchi Method / A. Yazdani, S. Pourjafar // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – № 67. – P. 16–20.
92. *Saeed Ghaffarpour Jahromi* Carbon fiber reinforced asphalt concrete / Saeed Ghaffarpour Jahromi, Nabiallah Ahmadi International // Journal of Earth Sciences and Engineering. – 2011. – Vol. 04. – № 06. – P. 941–944.
93. lib.itenas.ac.id [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lib.itenas.ac.id/kti/wp-content/uploads/2013/04/16.-paper_Maripave2003.pdf (Дата обращения: 10.01.2015).
94. *Hongsheng Qiu* Influence of filler–bitumen ratio on performance of modified asphalt mortar by additive / Hongsheng Qiu, Ximing Tan, Shu Shi, Heng Zhang // J. Mod. Transport. – 2013. – № 21(1). – P. 40–46.
95. *Hui Yao* Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy / Hui Yao, Zhanping You, Liang Li, Shu Wei Goh, Chee Huei Lee, Yoke Khin Yap, Xianming Shi // Construction and Building Materials. – 2013. – № 38. – P. 327–337.
96. US 5807478 A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.google.com.tr/patents/US5807478> (Дата обращения: 10.05.2014)
97. *Bin, L.* Effect of organo-montmorillonite on the morphology and aging properties of various bitumens / L. Bin, Z. Henlong, Y. Jianying // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. Aug. 2010. – P. 650–655.
98. *Dejie Zhou* Micron fly ash/SBS modified bitumen: preparation and aging property / Dejie Zhou, Nianfeng Han // Applied Mechanics and Materials Vols. 99 – 100. – 2011 – P. 1199–1202 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.1199.
99. *Ziari Hassan* Influence of Bentonite Additive on Bitumen and Asphalt Mixture Properties / Ziari Hassan, Divandari Hassan, Babagoli Rezvan, Akbari Ali // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – № 68. – P. 1534–1539.
100. *Шефферд, П.Б.* Минеральные наполнители. – М.: Москва, 1971. – 235 с.

101. *Sobolev, K.* The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous material / K. Sobolev, F. Ismael, R. Saha, N. Wasiuddin, N. Saltibus // *Fuel*. – 2014. – Vol. 116. – P. 471–477.

102. *Sobolev, K.* Application of fly ash in ASHphalt concrete: from Challenges to Opportunities // K. Sobolev, I. Florens, J. Bohler, A. Faheem, A. Covi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.flyash.info/2013/012-Sobolev-2013.pdf>

103. *Мухаметов, А.М.* Исследование технических свойств дорожного битума в композиции с целлюлозосодержащими стабилизирующими добавками / А.М. Мухаметов, О.К. Нугманов, Н.А. Лебедев // *Известия КГАСУ*. – 2011. – № 4 (18). – С. 260–266.

104. *Хойберга, А. Дж.* Битумные материалы (асфальты, смолы, пеки). Пер. с англ. / А. Дж. Хойберга. – М.: Химия», 1974. – 248 с.

105. *Гегерь, В.Я.* Управляемый контроль качества асфальтобетона на основе квалиметрии и радиометрии / В.Я. Гегерь // *Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов: тез. докл. всесоюзной конференции*. – Харьков, 1983. – С. 67–68.

106. *Traxler, R.N.* Asphalt, Its Composition. Properties and Uses / R.N. Traxler // New York. Reinhold, 1961. – 37 p.

107. *Подольский, В.П.* Армированный асфальтобетон с применением активных минеральных отходов и побочных отходов промышленности / В.П. Подольский, Г.А. Расстегаева // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2000. – № 9. – С. 10–11.

108. *Рыбьева, Т.Г.* Исследование влияния минералогического состава порошков на структурно-механические свойства битумоминеральных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.Г. Рыбьева. – М., 1960. 18 с.

109. *Базжин, Л.И.* Исследование влияния минералогического состава и структуры минеральных порошков на старение асфальтобетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Л.И. Базжин. – Харьков, 1974. – 21 с.

110. *Котлярский, Э.В.* Структурообразование асфальтобетона и его структурно-реологические свойства / Э.В. Котлярский // Методы и средства повышения надежности материалов и сооружений на автомобильных дорогах: сб. научн. трудов МАДИ. – 2000. – С. 48–56.
111. *Железко, Т.В.* Структура и свойства асфальтовяжущих / Т.В. Железко, Е.П. Железко // Изв. вузов. Строительство. – 1997. – № 3. – С. 35–42.
112. *Самодуров, С.И.* Асфальтобетон с активированным минеральным наполнителем / С.И. Самодуров, Г.А. Растегаева // Проектирование и строительство автомобильных дорог и мостов в Сибири. – Томск. – 1992. – С. 106–112.
113. *Терлецкая, Л.С.* Влияние структуры минерального порошка на свойства асфальтобетонной смеси / Л.С. Терлецкая // Опыт строительства асфальтобетонных покрытий: сб. науч. тр. МАДИ. – 1958. – Вып. 23. – С. 70–74.
114. *Ханина, Ц.Г.* Исследование свойств минеральных порошков для асфальтового бетона / Ц.Г. Ханина; под ред. В.В. Михайлова // Минеральные порошки для асфальтового бетона. – М.: Дориздат, 1940. – С. 124–132.
115. *Сахаров, П.В.* Способы проектирования асфальтобетонных смесей / П.В. Сахаров // Транспорт и дороги города. – 1935. – № 12. – С. 18–24.
116. *Ребиндер, П.А.* Вступительное слово / П.А. Ребиндер // м-лы работ симпоз. по структуре и структурообразованию в асфальтобетоне. – Балашиха. – 1968. – С. 5–9.
117. *Борщ, И.М.* Лесс как минеральный порошок для асфальтобетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.М. Борщ. – Харьков, 1952. – 25 с.
118. *Наполнители для полимерных композиционных материалов: справочное пособие; пер. с англ.; под ред. П.Г. Бабаевского.* – М.: Химия, 1981. – 736 с.
119. *Гриневич, Н.А.* Дорожно-строительные материалы: учеб. пособие / Н.А. Гриневич. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2011. – 97 с.
120. *Железко, Е.П.* Влияние вида минерального порошка на свойства асфальтобетонов / Е.П. Железко, Т.В. Касаткина // Композиционные строительные материалы (Структура, свойства, технология): сб. межвуз. научн. конф. – М. – 1990. – С. 75–78.

121. *Прокопец, В.С.* Битумные композиции с добавкой агрегатов наночастиц / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина // Научные исследования, наносистемы ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов (XIX научные чтения): сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 5–8 октября 2010 г., Белгород. – 2010. – Ч. 1. – С. 277–281.

122. *Соколов, Ю.В.* Исследование структуры и свойств концентрированных битумных мастик на основе битумов и технического углерода / Ю.В. Соколов, В.Д. Галдина, М.С. Цеханович, А.И. Жолос // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 10–11.

123. Пат. 2330057 Российская Федерация, МПК С 10 С3/04 Способ получения битума из кислого гудрона / О. П. Филиппова, А. М. Михайлова [и др.]; заявитель и патентообладатель ЯГТУ. – № 2007115684/04; опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5. – 2 с.

124. *Мардиросова, И.В.* Исследование влияния отхода ТУ как ингибитора процессов старения битума / И.В. Мардиросова, С.К. Илиополов, Е.В. Углова // Современные технологии и материалы при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог: тез. докл. Росс. науч.-технич. конф. – Суздаль, 1994. – С. 69–70.

125. *Эфа, А.К.* Использование ингибиторов для замедления старения вяжущего в асфальтобетонных смесях / А.К. Эфа, Ю.С. Тютеньков, В.Д. Орицин // Повышение надежности транспортных сооружений в условиях Сибири: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во Томского ГУ, 1996. – С. 106–109.

126. *Зуев, В.П.* Производство сажи / В.П. Зуев, В.В. Михайлов. – М.: Химия, 1970. – 289 с.

127. *Пиотровский, К.Б.* Старение и стабилизация синтетических каучуков и стабилизаторов / К.Б. Пиотровский, З.Н. Тарасова. – М.: Химия, 1980. – 264 с.

128. *Хомич, В.А.* Модифицирование глинистого сырья добавками технического углерода / В.А. Хомич, Т.С. Химич // Дорожно-транспортный комплекс, экономика, экология, строительство, архитектура: м-лы междунар. науч.-технич. конф. – Омск: СибАДИ, 2003. – К. 2. – С. 271–272.

129. *Прокопец, В.С.* Битумные композиции с добавкой агрегатов наночастиц / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2012. – № 5. – С. 16–17.

130. *Николаева, Л.А.* Дорожный асфальтобетон на основе модифицированного битумного вяжущего / Л.А. Николаева, О.Н. Буренина, С.Н. Попов // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 85 (01). – С. 1–10.

131. Заявка на патент Николаева Лира Александровна, Буренина Ольга Николаевна, Попов Савва Николаевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, подача заявки: 2012-07-11, публикация патента: 20.01.2014.

132. *Киселев, В.П.* Органический компонент асфальтобетонных смесей / В.П. Киселев, А.А. Ефремов, Н.В. Кеменев, М.Б. Бугаенко // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 3. – С. 207–218.

133. *Киселев, В.П.* Возможности использования скорлупы кедрового ореха в качестве модификатора нефтяного битума / В.П. Киселев, Ю.Н. Кукса, А.А. Ефремов // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 59–63.

134. *Киселев, В.П.* Отходы лесохимии в качестве модифицирующих добавок в дорожные покрытия / В.П. Киселев, Э.В. Бугаенко, К.Б. Толстихин, А.А. Ефремов // Ресурсы регионов России. – 2001. – № 5. – С. 38–41.

135. *Киселёв, В.П.* Влияние добавок обладающих антиоксидантной активностью, на качество асфальтобетонных смесей / В.П. Киселёв, А.А. Ефремов, Н.В. Кеменев, М.Б. Бугаенко // Известия вузов. Строительство. – 2012. – №. 3. – С 49–55.

136. *Костин, В.И.* Щебеночно-мастичный асфальтобетон для дорожных покрытий: уч. пособие по курсу «Новые технологии в дорожном строительстве» / В.И. Костин. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – 65 с.

137. *Илиополов, С.К.* Влияние модификатора РТЭП и добавки «Viatop-66» на свойства ЩМА / С.К. Илиополов, И.В. Мардиросова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2010. – № 2. – С. 38–40.

138. *Мухаметханов, А.М.* Исследование технических свойств дорожного битума в композиции с целлюлозосодержащими стабилизирующими добавками / А.М. Мухаметханов, О.К. Нугманов, Н.А. Лебедев // Известия КГАСУ. – 2011. – № 4 (18). – С. 260–267.
139. *Киселев, В.П.* Составленные вяжущие на основе битума, гудрона и гидролизного лингина / В.П. Киселев, Г.Т. Тюменева, Л.А. Рубчевская // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 9. – С. 45–50.
140. *Киселев, В.П.* Добавка для битума на основе модифицированных гидролизным лингином хлорорганических отходов химических производств / В.П. Киселев, А.Ф. Гоготов, М.Б. Бугаенко, Л.А. Иванова, В.Г. Дронов, А.А. Григорьева, Н.В. Кеменев // Журнал Сибирского федерального университета. – 2013. – Том 6. – № 8. – С. 885–894.
141. *Min-Chih Liao* Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen-Filler Mastics / Min-Chih Liao, Jian-Shiuh Chen, Gordon Airey // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2013. – Vol. 9.
142. *Rodgers, W.* MPhil Rheological and electrical properties of modified bitumen / W. Rodgers, B. Gunay, A. Woodside // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 163. November, 2010. – P. 175–182.
143. *Лебедев, М.С.* Изменение свойств минеральных порошков из алюмосиликатного сырья под влиянием термической модификации / М.С. Лебедев, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, И.Ю. Потапова // Строительные материалы. – 2012. – № 9. – С. 68–70.
144. *Лебедев, М.С.* Особенности состава алюмосиликатного сырья с точки зрения его использования для получения дорожно-строительных материалов / Лебедев М.С., Потапова И.Ю., Лютенко А.О. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 5 (52). – С. 70–74.
145. *Лютенко, А.О.* Проблемы использования алюмосиликатного сырья при производстве асфальтобетонов / Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения): сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Белгород. – 2011. – С. 130–132.

146. *Пугин, К.Г.* Комплексная утилизация отходов предприятий черной металлургии в Пермском крае / К.Г. Пугин, В.С. Юшков // Научно-технический прогресс в металлургии: тр. V междунар. науч.-практ. конф., 15–16 октября 2009. – Темиртау, 2009. – С. 571–575.
147. *Русина, В.В.* Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учебное пособие / В.В. Русина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 224 с.
148. *Энтин, З.Б.* Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона / З.Б. Энтин, Л.С. Нефедова, Н. Стржалковская // Цемент и его применение. – 2012. – № 2. – С 40–46.
149. *Данилович, И.Ю.* Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов / И.Ю. Данилович, Н.А. Сканави. – М.: Высшая школа, 1988.
150. *Панибратов, Ю.П.* К вопросу применения зол ТЭС в бетонах / Ю.П. Панибратов, В.Д. Староверов // Технология бетонов. – 2011. – № 1–2. – С. 43–47.
151. *Путилова, В.Я.* Экология энергетики: уч. пособие для ВУЗов / В.Я. Путилов. – М.: Из-во МЭИ, 2003. – 716 с.
152. *Казьмина, О.В.* Получение пеностекольных материалов на основе золошлаковых отходов в тепловых электростанциях / О.В. Казьмина, Н.А. Кузнецова, В.И. Верещагин, В.П. Казьмин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 3. – С. 52–56.
153. *Герк, С.А.* Исследование состава и структуры отходов топливно-энергетического комплекса с применением электронно-микроскопического и элементного анализов / С.А. Герк, В.А. Смолий // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 18–21.
154. *Энтин, З.Б.* Ещё раз о золах-уноса ТЭС / З.Б. Энтин, Н. Стржалковская // Цемент и его применение. – 2009. – С 106–111.
155. *Путилин, Е.И.* Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС / Е.И. Путилин. – М., 2003. – 60 с.

156. *Кизильштейн, Л.Я.* Компоненты зол и шлаков ТЭС / Л.Я. Кизильштейн, И.В. Дубов, А.П. Шпицгауз С.Г. Парада. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 176 с.
157. *Кожуховский, И.* Институционализация в сфере обращения ЗШО – актуальная проблема угольной энергетики России / И. Кожуховский, Ю. Целыковский // *Электроэнергия. Передача и распределение.* – 2012.
158. *Балабанов, В.Б.* Применение зольных отходов в дорожном строительстве / В.Б. Балабанов, В.Л. Николаенко // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* – 2011. – Т. 53. – № 6. – С. 37–41.
159. *Адеева, Л.Н.* Зола ТЭЦ – перспективное сырье для промышленности / Л.Н. Адеева, В.Ф. Борбат // *Вестн. Ом. Ун-та.* – 2009. – № 2. – С. 141–151.
160. *Корнеев, В.И.* Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимеры и их отличительные особенности / В.И. Корнеев, А.С. Брыков // *Цемент и его применение.* – 2010. – С. 51–55.
161. *Рахимова, Н.Р.* Влияние добавок золы на свойства шлакощелочных вяжущих и бетонов / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов, Р.Ф. Гатауллин // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* – 2007. – № 3. – С. 36–37.
162. *Целыковский, Ю.К.* Некоторые проблемы использования золошлаковых отходов ТЭС в России / Ю.К. Целыковский // *Энергетик.* – 1998. – № 7. – С. 29–34.
163. *Целыковский, Ю.К.* Опыт промышленного использования золошлаковых отходов ТЭС / Ю.К. Целыковский // *Новое в российской энергетике.* Энергоиздат. – 2000. – № 2. – С. 22–31.
164. *Чулкова, И.Л.* Автоматизированное проектирование строительных композитов / И.Л. Чулкова // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии.* – 2012. – № 5 (27). – С. 101–106.
165. *Абызов, А.Н.* Применение жаростойких бетонов на основе высокоглиноземистых техногенных материалов взамен импортных огнеупоров / А.Н. Абызов, П.А. Юферов, В.М. Рывтин, В.А. Перепелицын, В.Г. Григорьев // *Новые огнеупоры.* – 2012. – № 3. – С. 83–84.

166. *Berry, E.E.* Fly Ash for use in concrete – a critical review / E.E. Berry, V.M. Malhotra // ACIJ. – 1982. – Vol. 2. – № 3. – P. 59–73.
167. *Lane, R.O.* Properties and use of fly ash in Portland cement concrete / R.O. Lane, J.F. Best // Concrete international. – 1982. – Vol. 4. – № 7. – P. 81–92.
168. *Михеев, В.П.* Новые материалы и изделия из золы уноса тепловых электростанций / В.П. Михеев, С.В. Рогачева, В.И. Шаталов, А.Ф. Бернадский // Энергетик. – 1997. – № 10. – С. 16–17.
169. *Успенский, С.К.* Переработка и подготовка золошлаковых материалов к использованию / С.К. Успенский // Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11». – С 93–111.
170. *Барахтенко, В.В.* Использование золы уноса при производстве пористых строительных материалов нового поколения / В.В. Барахтенко, Е.В. Зелинская, Е.О. Костюкова и др. // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: м-лы III Междунар. научн.-практ. семинара, 22–23 апреля 2010. – М.: Издательский дом МЭИ. – С. 60–63.
171. *Shutov, F.* Recycling of Fly Ash for Production of Plastic Lumber / F. Shutov // The Journal of Solid Waste Technology and Management: Proceedings of International Conf. on Solid Waste. – Philadelphia. USA, 2007.
172. *Костюкова, Е.О.* Промышленные отходы – сырье для строительных материалов будущего: Иркутский регион / Е.О. Костюкова, В.В. Барахтенко, Е.В. Зелинская, Ф.А. Шутов // Экология урбанизированных территорий. – 2009. – № 4. – С. 15–18.
173. *Еременко, Е.В.* Опыт Каширской ГРЭС по решению проблемы утилизации золошлаков / Е.В. Еременко, В.С. Махотин, А.Е. Чумаков // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: м-лы III Междунар. научн.-практ. семинара, 22–23 апреля 2010. – М.: Издательский дом МЭИ. – С. 43–44.

174. *Путилов, В.Я.* Кондиционирование золошлаков энергетики в России / В.Я. Путилов, И.В. Путилова // Золошлаки энергетики: м-лы XVII Междунар. конф. Варшава, 24–26 октября 2010. – С. 27–42.
175. *Сиротюк, В.В.* Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям / В.В. Сиротюк, Е.В. Иванов / Автомобильные дороги. – 2013. – № 9. – С. 89–92.
176. *Степенец, В.Г.* Опыт строительства дорожных одежд с основаниями из золоминеральных смесей в Омской области / В.Г. Степенец, М.В. Исаенко, А.В. Герасимов, И.В. Герасимова // Автомобильные дороги. – 2013. – № 9. – С. 93–94.
177. *Езов, В.В.* Преимущества оснований из ЗМС / В.В. Езов, Ю.П. Марсов, Л.М. Таршилов // Автомобильные дороги. – 2013. – № 9. – С. 96–97.
178. *Балабатон, В.Б.* Укатываемый дорожный золоасфальтобетон / В.Б. Балабатон, В.Л. Николаенко // Архитектура и строительство России. – 2012. – № 1. – С. 18–25.
179. *Балабатон, В.Б.* Применение зольных отходов в дорожном строительстве / В.Б. Балабатон, В.Л. Николаенко // Вестник Иркутского государственного технологического университета. – 2011. – Т.53. – № 6. – С. 37–41.
180. *Меренцова, Г.С.* Особенности использования укрепленных грунтов при строительстве автомобильных дорог в условиях Западной Сибири / Г.С. Меренцова, А.О. Хребто // Ползуновский вестник. – 2011 – № 1. – С. 277–281.
181. *Lahtinen, P.* Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads: Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / P. Lahtinen. – Helsinki, 2001. – 102 p.
182. *Lahtinen, P.* New methods for the renovation of gravel roads / Lahtinen P., Jyrava H., Suni H. // Paper for IRF Regional Conference, European Transport and Roads. 1999. Lahti. – 7 p.
183. *Сиротюк, В.В.* Стандартизация и перспективы использования золошлаков энергетики для дорожного строительства в России / В.В. Сиротюк // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: м-лы III научн.-

практ. семинара, 22–23 апреля 2010. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 58 – 59.

184. *Ярмолинская, Н.И.* Использование золошлаков гидроудаления дальневосточных ТЭС / Н.И. Ярмолинская, И.Е. Закурдаев, А.С. Латкин // Автомобильные дороги. – 1988. – № 9. – С 17–19.

185. *Путилин, Е.И.* Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: обзор. информ. отчет. и зарубеж. опыта применения золошлаков от сжигания твердого вида топлива на ТЭС. – М.: СоюздорНИИ. – 2003. – 58 с.

186. *Nagesh Tatoba Suryawanshi* Use of Eco-Friendly Material like Fly Ash in Rigid Pavement Construction & It's Cost Benefit Analysis / Nagesh Tatoba Suryawanshi, Samitinjay S. Bansode, Pravin D. Nemade // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2012. – Vol. 2. – № 12. – P. 795–800.

187. ГОСТ 30108–94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – Введ. 30.06.1994. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 4 с.

188. Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009, Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523–09.

189. ГОСТ 11501–78 Битумы нефтяные. Метод определения глубины проникания иглы. – Введ. 01.01.1980. – М.: Стандартиформ, 2005. – 5 с.

190. ГОСТ 11505–75 Битумы нефтяные. Метод определения растяжимости. – Введ. 01.01.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 4 с.

191. ГОСТ 11506–73 Битумы нефтяные. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару. – Введ. 07.01.1974. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 5 с.

192. ГОСТ 11507–78 Битумы нефтяные. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу. – Введ. 01.01.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 4 с.

193. ГОСТ 8735–88 Песок для строительных работ. Методы испытаний. – Введ. 01.11.2014. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 55 с.

194. *Ковба, Л.М.* Рентгенофазовый анализ / Л.М. Ковба, В.К. Трунов. – М.: МГУ, 1968. – 232 с.
195. *Пушаровский, Д.Ю.* Рентгенография минералов / Д.Ю. Пушаровский – М.: Геоинформарк, 2000. – 292 с.
196. *Solovyov, L.A.* Includes Ritviold and Derivative Difference Minimization (DDM) methods // Journal of Applied Crystallografy. – 2004. – № 37. –Рр. 743–749.
197. *Тетерин, Э.Г.* Прикладная ИК-спектроскопия / Э.Г. Тетерин, пер. с англ. – Москва, 182.
198. *Ефимова, А.И.* Инфракрасная Фурье-спектроскопия / А.И. Ефимова, В.Б. Зайцев, Н.Ю. Болдырев, П.К. Кашкаров – М.: Физический факультет МГУ, 2008. – 133 с.
199. Обработка данных инфракрасной Фурье-спектроскопии: метод. пособие. Институт физики СО РАН. – Красноярск, 2005. – 48 с.
200. *Злоказов, В.Б.* Математические методы анализа экспериментальных спектров и спектроподобных распределений / В.Б. Злоказов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – Дубна, 1985. – Т. 16. – Вып. 5. – С. 89–96.
201. *Пацаева, С.В.* Обратные задачи спектроскопии комбинационного рассеяния света в жидкой воде: дисс. канд. физ.-мат. наук., МГУ, 1989.
202. Кислотно-основные свойства поверхности твердых веществ: метод. указания. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1989. – 23 с.
203. ГОСТ 8736–93 Песок для строительных работ. Технические условия. – Введ. 01.07.1995. – М: Изд-во стандартов, 1995. – 10 с.
204. ГОСТ 31108–94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – Введ. 30.06.1994. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 4 с.
205. *Грушко, И.М.* Испытания дорожно-строительных материалов. Лабораторный практикум. – М.: Транспорт, 1985. – 201 с.
206. *Черноусов, Д.И.* Применение асфальтового вяжущего вещества с шунгитом при устройстве дорожных покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.И. Черноусов. – Воронеж, 2011. – 19 с.

207. *Высоцкая, М.А.* Удивительный шунгит! / М.А. Высоцкая, С.Ю. Русина, Д.А. Кузнецов, М.Ю. Федоров // Оценка рисков и безопасность в строительстве. Новое качество и надежность строительных материалов и конструкций на основе высоких технологий: сб. науч. трудов, 26–28 сентября 2012 г. – М.: МГСУ, 2012. – Вып. 4. – С. 18–20.

208. *Солдатов, А.А.* Структуры поверхности пористых порошков на основе отсевов дробления керамзита и их адсорбционная активность / А.А. Солдатов, Ю.Г. Борисенко // Строительные материалы. – 2011. – №6. – С. 36–38.

209. *Солдатов, А.А.* Повышение сдвигоустойчивости и износостойкости дорожных покрытий при использовании высокодисперсных отсевов дробления керамзита в асфальтобетонных смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Солдатов. – Воронеж, 2011. – 19 с.

210. *Борисенко, Ю.Г.* Битумно-минеральные композиции, модифицированные высокодисперсными отсевами дробления керамзита / Ю.Г. Борисенко, А.А. Солдатов, С.О. Яшин // Строительные материалы. – 2009. – №1. – С. 62–63.

211. *Коротаев, А.П.* Повышение качества асфальтобетона за счет использования пористого минерального порошка: дис. ... канд. техн. наук. / А.П. Коротаев. – Белгород, 2009. – 161 с.

212. *Прокопец, В.С.* Структурно-механические и деформативные свойства асфальтобетона на пористом заполнителе / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.И. Надькто, В.А. Иванцов, Г.А. Подрез // Труды первого Всероссийского дорожного конгресса. – М.: МАДИ (ГТУ), 2009. – С. 226–233.

213. *Печерский, С.А.* Использование вулканического туфа в горячих асфальтобетонах / С.А. Печерский, А.В. Битуев, Н.В. Архиничева, Е.Г. Щукина // Строительные материалы. – 2010. – №2. – С. 32–33.

214. *Гридчин, А.М.* Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита / А.М. Гридчин, А.П. Коротаев, В.В. Ядыкина, Д.А. Кузнецов, М.А. Высоцкая // Строительные материалы. – 2009. – №5. – С. 42–44.

215. *Борисенко, Ю.Г.* Повышение качества легких битумоминеральных композиций путем совершенствования подбора минеральных составов / Ю.Г. Бо-

рисенко, В.В. Лынник, О.А. Борисенко // Строительные материалы. – 2011. – №8. – С. 54–55.

216. *Высоцкая, М.А.* Дорожные композиты на основе дисперсных пористых наполнителей / М.А. Высоцкая, Д.А. Кузнецов, М.Ю. Федоров // Современные тенденции и направления строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений: Сб. науч.-технич. конф. (25–26 октября 2012). – Минск, 2012. – С. 62–65.

217. *Федоров, М.Ю.* Асфальтобетон на основе дисперсного наномодифицированного пористого сырья: дис. ... канд. техн. наук. / М.Ю. Федоров. – Белгород, 2013. – 192 с.

218. *Высоцкая, М.А.* Особенности структурообразования битумо-минеральных композиций с применением пористого сырья / М.А. Высоцкая, Д.К. Кузнецов, Д.Е. Барабаш // Строительные материалы. – 2014. – № 1-2. – С. 68–71.

219. *Путилин, Е.И. Цветков, В.С.* Применение зол-уноса и золошлаковых отходов при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива ТЭС. – Москва, 2003. – 32. с.

220. Standard Test Method for Determining Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO Designation: TP5, based on SHRP Product 1007, September 1993.

221. AASHTO T315-10, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010. – pp. 32.

222. *Мецгер, Т.* SHRP Битум/асфальт – испытания. Реологическое изучение битумных вяжущих, используемых в дорожном строительстве. – 17 с.

223. *Лебедев, М.С.* Влияние добавок низкокальциевой золы-уноса тэсна характеристики дорожного битумного вяжущего / М.С. Лебедев, В.В. Строкова, И.Ю. Потапова, Э.В. Котлярский // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 8-11.

224. *Беляков, А.Б.* Современные аспекты исследований долговечности строительных материалов / А.Б. Беляков, Ю.Э. Васильев, Г.И. Евгеньев, Э.В. Кот-

лярский // Методы и средства повышения надежности материалов и сооружений на автодорогах с учетом транспортных воздействий / Моск. гос. автомоб.-дор. ин-т (техн. ун-т). – М, 1996. – С. 129–132.

225. *Ерофеев, В.Т.* Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов (технология, свойства, долговечность) / В.Т. Ерофеев, Ю.М. Баженов, Ю.И. Калгин // Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. – ВГАСУ. – Саранск, 2009.

226. *Ерофеев, В.Т.* Исследование долговечности битумных композитов в условиях переменной влажности, ультрафиолетового облучения и морской воды / В.Т. Ерофеев, А.И. Сальникова, Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, Е.А. Варченко Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-12. – С. 2549–2556.

227. *Котлярский Э.В.* Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации / Э.В. Котлярский, О.А. Воейко. – М.: Техполиграфцентр, 2007. – 136 с.

228. ГОСТ 12801–98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Введ. 1999–01–01. – М.: МНТКС, 1999. – 41 с.

229. *Борисенко, Ю.Г.* Использование керамзитовой пыли в составе легких асфальтобетонов / Ю.Г. Борисенко, О.А. Борисенко // Строит. материалы. – 2007. – №9. – С. 48–49.

230. BS EN 12697-22:2003 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking. – Publication Date: 14 January 2004. – 32 p.

231. *Силкин, А.В.* Анализ себестоимости асфальтобетонных смесей и динамика цен на материалы и энергоресурсы для их производства / А.В. Силкин, А.П. Лупанов, А.С. Суханов // Строит. материалы. – 2009. – №11. – С. 6–7.

232. Асфальтобетонные заводы и технологическое оборудование для их оснащения [Электронный ресурс] / Еженедельник "Стройка" Санкт-Петербург №21. – Режим доступа: <http://library.stroit.ru/articles/asfzavod/>

233. *Тимофеев, В.А.* Технологическое оборудование асфальтобетонных заводов и эмульсионных баз / В.А. Тимофеев, А.А. Васильев. – М. Машиностроение, 1990. – 256.

234. *Силкин, В.В.* Методические указания к практическим занятиям по курсу «Технология и организация работ на предприятиях дорожного строительства» / В.В. Силкин, Е.В. Жустаева, В.М. Ольховников. – М.: ООО «Технополиграфцентр», 2005. – 74 с.

235. *Крылов, Э.И.* Анализ эффективности инвестиционной и инновационной деятельности предприятия. / Э.И. Крылов, В.М. Власова. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 168 с.

236. *Ример, М.И.* Экономическая оценка инвестиций. / М.И. Ример, А.Д. Касатов и др. – СПб: Питер, 2006. – 153 с.

237. Государственные элементные сметные нормы на строительные и специальные строительные работы. ГЭСН 81-02-27-2001. Часть 27. Автомобильные дороги. – Введ. 31.01.2014. – М., 2014. – 121 с.

238. МДС 81-35.2004. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации – Введ. 9.03.2004. – М., 2004. – 68 с.

239. МДС 81-25.2001. Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве.– Введ. 1.03.2001. – М., 2001. – 13 с.

240. МДС 81-33.2004. Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве. – Введ. 12.01.2004. – М., 2004. – 33 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ЦЕНТР «РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА»
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
№ САРК RU.0001.443195 ОТ 22 АВГУСТА 2012 ГОДА

Действителен до 22 февраля 2017 г.
Зарегистрирован в государственном реестре № 001376
(Юридический адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, дом 46,
учебный корпус №2 (лабораторный корпус), каб. 321;
e-mail: unibo@mail.ru; тел./факс: (4722) 55-16-62 / (4722)54-96-04)

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (ЕРН)
№ 98 от «7» марта 2014 г.

Проба: ЗУ Рептинской ГРЭС
Описание пробы:
Место отбора пробы:
Поставщик: кафедра СМИнК, секция НСМ
Заказчик: кафедра СМИнК, секция НСМ
Методика приготовления счётного образца: ГОСТ 30108-94.
Масса счётного образца: 910 г.
Дата измерения: 07.03.2014 г.
Нормативно-техническая документация:
Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного
гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».
Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Санитарные правила и нормы
СанПиН 2.6.1.2523-09.
ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной
эффективной активности естественных радионуклидов.
Средство измерения: Комплекс спектрометрический «ПРОГРЕСС» завод № 0693-Г
Поверен ФГУ «Менделеевский ЦСМ» Свидетельство № 42010.2М371.
Геометрия измерения: Сосуд «Маринелли» 1л.

Наименование показателя, ед. измерения	Результат измерений
Удельная Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	-0,5762 ± 2,5654
Удельная Активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	42,8386 ± 8,5094
Удельная Активность ²³² Th=, Бк/кг	36,3044 ± 8,3248
Удельная Активность ⁴⁰ K, Бк/кг	146,7 ± 56,2
Эффективная удельная активность A _{эфф} , Бк/кг	103,2373 ± 24,3896

Примечание: Данные об активностях приводятся с указанием погрешностей измерений.
Заключение о классе материала: Согласно ГОСТ 30108-94. Норм радиационной
безопасности (НРБ-99/2009) материал относится к I классу (A_{эфф} = A_{ра} + 1,3A_{th} + 0,09A_к ≤
370 Бк/кг) и может применяться во всех видах строительства.



Измерения проводил инженер ЦРМ, к.т.н. Д.В. Воронов

ЦЕНТР «РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА»
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
№ САРК RU.0001.443195 ОТ 22 АВГУСТА 2012 ГОДА

Действителен до 22 февраля 2017 г.
Зарегистрирован в государственном реестре № 001376
(Юридический адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, дом 46,
учебный корпус №2 (лабораторный корпус), каб. 321;
e-mail: unibo@mail.ru; тел./факс: (4722) 55-16-62 / (4722)54-96-04)

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (ЕРН)
№ 97 от «7» марта 2014 г.

Проба: ЗУ Троицкой ГРЭС
Описание пробы:
Место отбора пробы:
Поставщик: кафедра СМИнК, секция НСМ
Заказчик: кафедра СМИнК, секция НСМ
Методика приготовления счётного образца: ГОСТ 30108-94.
Масса счётного образца: 690 г.
Дата измерения: 07.03.2014 г.
Нормативно-техническая документация:
Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного
гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».
Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Санитарные правила и нормы
СанПиН 2.6.1.2523-09.
ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной
эффективной активности естественных радионуклидов.
Средство измерения: Комплекс спектрометрический «ПРОГРЕСС» завод № 0693-Г
Поверен ФГУ «Менделеевский ЦСМ» Свидетельство № 42010.2М371.
Геометрия измерения: Сосуд «Маринелли» 1л.

Наименование показателя, ед. измерения	Результат измерений
Удельная Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	-0,0309 ± 2,9460
Удельная Активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	34,35557 ± 8,3215
Удельная Активность ²³² Th=, Бк/кг	37,1136 ± 9,3164
Удельная Активность ⁴⁰ K, Бк/кг	107,6 ± 56,3
Эффективная удельная активность A _{эфф} , Бк/кг	92,2874 ± 26,1173

Примечание: Данные об активностях приводятся с указанием погрешностей измерений.
Заключение о классе материала: Согласно ГОСТ 30108-94. Норм радиационной
безопасности (НРБ-99/2009) материал относится к I классу (A_{эфф} = A_{ра} + 1,3A_{th} + 0,09A_к ≤
370 Бк/кг) и может применяться во всех видах строительства.



Измерения проводил инженер ЦРМ, к.т.н. Д.В. Воронов

ЦЕНТР «РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА»

АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
№ САРК RU.0001.443195 ОТ 22 АВГУСТА 2012 ГОДА

Действителен до 22 февраля 2017 г.

Зарегистрирован в государственном реестре № 001376
(Юридический адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, дом 46,
учебный корпус №2 (лабораторный корпус), каб. 321;
e-mail: utpdo@mail.ru; тел./факс: (4722) 55-16-62 / (4722)54-96-04)

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (ЕРН)

№ 99 от « 7 » марта 2014 г.

Проба: ЗУ WE Energies (США)

Описание пробы:

Место отбора пробы:

Поставщик:

Заказчик: кафедра СМИиК, секция НСМ

Методика приготовления счётного образца: ГОСТ 30108-94.

Масса счётного образца: 1080 г.

Дата измерения: 07.03.2014 г.

Нормативно-техническая документация:

Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного
гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».

Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Санитарные правила и нормы
СанПиН 2.6.1.2523-09.

ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной
эффективной активности естественных радионуклидов.

Средство измерения: Комплекс спектрометрический «ПРОГРЕСС» завод № 0693-Г
Поверен ФГУ «Менделеевский ЦСМ» Свидетельство № 42010.2М371.

Геометрия измерения: Сосуд «Маринелли» 1л.

Средние результаты измерений приведены в таблице:

Наименование показателя, ед. измерения	Результат измерений
Удельная Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	3,3300 ± 3,4445
Удельная Активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	92,8 ± 14,3
Удельная Активность ²³² Th, Бк/кг	76,2 ± 13,1
Удельная Активность ⁴⁰ K, Бк/кг	396,7 ± 99,5
Эффективная удельная активность A _{эфф} , Бк/кг	227,563 ± 40,285

Примечание: Данные об активностях приводятся с указанием погрешностей измерений.

Заключение о классе материала: Согласно ГОСТ 30108-94. Норм радиационной
безопасности (НРБ-99/2009) материал относится к I классу (A_{эфф} = 1,3A_{Th} + 0,09A_K ≤
370 Бк/кг) и может применяться во всех видах строительства.

Измерения проводил инженер ЦРМ, к.т.н.

Д.В. Воронов



ЦЕНТР «РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА»

АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
№ САРК RU.0001.443195 ОТ 22 АВГУСТА 2012 ГОДА

Действителен до 22 февраля 2017 г.

Зарегистрирован в государственном реестре № 001376
(Юридический адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, дом 46,
учебный корпус №2 (лабораторный корпус), каб. 321;
e-mail: utpdo@mail.ru; тел./факс: (4722) 55-16-62 / (4722)54-96-04)

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (ЕРН)

№ 95 от « 7 » марта 2014 г.

Проба: ЗУ Новоторской ТЭС

Описание пробы:

Место отбора пробы:

Поставщик:

Заказчик: кафедра СМИиК, секция НСМ

Методика приготовления счётного образца: ГОСТ 30108-94.

Масса счётного образца: 870 г.

Дата измерения: 07.03.2014 г.

Нормативно-техническая документация:

Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного
гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».

Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Санитарные правила и нормы
СанПиН 2.6.1.2523-09.

ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной
эффективной активности естественных радионуклидов.

Средство измерения: Комплекс спектрометрический «ПРОГРЕСС» завод № 0693-Г
Поверен ФГУ «Менделеевский ЦСМ» Свидетельство № 42010.2М371.

Геометрия измерения: Сосуд «Маринелли» 1л.

Средние результаты измерений приведены в таблице:

Наименование показателя, ед. измерения	Результат измерений
Удельная Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	-2,6524 ± 2,9684
Удельная Активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	68,5 ± 11,8
Удельная Активность ²³² Th, Бк/кг	38,3868 ± 9,1085
Удельная Активность ⁴⁰ K, Бк/кг	533 ± 125
Эффективная удельная активность A _{эфф} , Бк/кг	109,6729 ± 34,8911

Примечание: Данные об активностях приводятся с указанием погрешностей измерений.

Заключение о классе материала: Согласно ГОСТ 30108-94. Норм радиационной
безопасности (НРБ-99/2009) материал относится к I классу (A_{эфф} = 1,3A_{Th} + 0,09A_K ≤
370 Бк/кг) и может применяться во всех видах строительства.

Измерения проводил инженер ЦРМ, к.т.н.

Д.В. Воронов



ЦЕНТР «РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА»
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
№ САРК RU.0001.443195 ОТ 22 АВГУСТА 2012 ГОДА
Действителен до 22 февраля 2017 г.
Зарегистрирован в государственном реестре № 001376
(Юридический адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костокова, дом 46,
учебный корпус №2 (лабораторный корпус), каб. 321;
e-mail: utpdo@mail.ru; тел./факс: (4722) 55-16-62 / (4722)54-96-04)

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (ЕРН)
№ 100 от « 1 » марта 2014 г.

Проба: ЗУ Columbia Energy Center (США)
Описание пробы:
Место отбора пробы:
Поставщик:
Заказчик: кафедра СМийК, секция НСМ
Методика приготовления счётного образца: ГОСТ 30108-94.
Масса счётного образца: 1190 г.
Дата измерения: 07.03.2014 г.
Нормативно-техническая документация:
Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтиляционного
гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».
Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Санитарные правила и нормы
СанПиН 2.6.1.2523-09.
ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительных. Определение удельной
эффективной активности естественных радионуклидов.
Средство измерения: Комплекс спектрометрический «ПРОГРЕСС», завод. № 0693-Г
Поверен ФГУ «Менделеевский ЦСМ» Свидетельство № 42010.2М371.
Геометрия измерения: Сосуд «Маринелли» 1л.
Средние результаты измерений приведены в таблице:

Наименование показателя, ед. измерения	Результат измерений
Удельная Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	0,3058 ± 3,1245
Удельная Активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	114,7 ± 16,6
Удельная Активность ²³² Th=, Бк/кг	101,0 ± 15,7
Удельная Активность ⁴⁰ K, Бк/кг	60,3 ± 42,5
Эффективная удельная активность A _{эфф} , Бк/кг	251,427 ± 40,835

Примечание: Данные об активностях приводятся с указанием погрешностей измерений.

Заключение о классе материала: Согласно ГОСТ 30108-94. Норм радиационной
безопасности (НРБ-99/2009) материал относится к I классу (A_{эфф} = A_{ср} + 1,3A_{тн} + 0,09A_к ≤
370 Бк/кг) и может применяться во всех видах строительства.



Измерения проводил инженер ЦРМ, к.т.н. Д.В. Воронов

ЦЕНТР «РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА»
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
№ САРК RU.0001.443195 ОТ 22 АВГУСТА 2012 ГОДА
Действителен до 22 февраля 2017 г.
Зарегистрирован в государственном реестре № 001376
(Юридический адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костокова, дом 46,
учебный корпус №2 (лабораторный корпус), каб. 331;
e-mail: utpdo@mail.ru; тел./факс: (4722) 55-16-62 / (4722)54-96-04)

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (ЕРН)
№ 202 от « 20 » мая 2015 г.

Проба: ЗУ Назаровской ТЭС
Описание пробы:
Место отбора пробы:
Поставщик:
Заказчик:
Методика приготовления счётного образца: ГОСТ 30108-94
Масса счётного образца: 1100 г.
Дата измерения: 19.05.2015 г.
Нормативно-техническая документация:
Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтиляционного
гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».
Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Санитарные правила и нормы
СанПиН 2.6.1.2523-09.
ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительных. Определение удельной
эффективной активности естественных радионуклидов.
Средство измерения: Комплекс спектрометрический «ПРОГРЕСС», завод. № 0693-Г.
Поверен ФГУП ВНИИФРИ, свидетельство № 42010.4К136 до 13.08.2015 г.
Геометрия измерения: Сосуд «Маринелли» 1л.
Средние результаты измерений приведены в таблице:

Наименование показателя, ед. измерения	Результат измерений
Удельная Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	менее 3
Удельная Активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	315,6 ± 38,1
Удельная Активность ²³² Th=, Бк/кг	33,0554 ± 8,7382
Удельная Активность ⁴⁰ K, Бк/кг	79,9 ± 55,2
Эффективная удельная активность A _{эфф} , Бк/кг	365,7630 ± 54,4277

Примечание: Данные об активностях приводятся с указанием погрешностей измерений.

Заключение о классе материала: Согласно ГОСТ 30108-94. Норм радиационной
безопасности (НРБ-99/2009) материал относится к I классу (A_{эфф} = A_{ср} + 1,3A_{тн} + 0,09A_к ≤
370 Бк/кг) и может применяться во всех видах строительства.



Измерения проводил: инженер ЦРМ, к.т.н. Д.В. Воронов

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

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе,
д-р техн. наук, профессор
Е.И. Евтушенко
«25» июня 2014 г.



РЕКОМЕНДАЦИИ
по применению зол-уноса различного состава
в качестве структурирующих добавок битума

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
д-р. техн. наук, профессор
В.В. Строкова
«25» июня 2014 г.

Исполнители:
канд. техн. наук
Т.В. Дмитриева
«25» июня 2014 г.

аспирант
И.Ю. Маркова
«25» июня 2014 г.

Белгород 2014 г.

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

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной работе
 д-р техн. наук, профессор
 _____ Е.И. Евтушенко
 « 7 » октября 20 14 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
 д-р экон. наук, профессор
 _____ С.Н. Глаголев
 « 8 » октября 20 14 г.

ЗОЛОБИТУМНОЕ ВЯЖУЩЕЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛ-УНОСА ТЭС

Технические условия

СТО 02066339-023-2014

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
 д-р техн. наук, профессор
 _____ В.В. Строкова
 « 6 » октября 20 14 г.

Исполнители:

канд. техн. наук
 _____ Т.В. Дмитриева
 « 6 » октября 20 14 г.
 аспирант
 _____ И.Ю. Маркова
 « 6 » октября 20 14 г.

Белгород 20 14 г.

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

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной работе
 д-р техн. наук, профессор
 _____ Е.И. Евтушенко
 «21» октября 20 14 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
 д-р экон. наук, профессор
 _____ С.Н. Глаголев
 «22» октября 20 14 г.

**АСФАЛЬТОБЕТОН НА ОСНОВЕ ЗОЛОБИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО**

Технические условия
 СТО 02066339-024-2014

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
 д-р техн. наук, профессор
 _____ В.В. Строкова
 «20» октября 20 14 г.

Исполнители:

канд. техн. наук
 _____ Т.В. Дмитриева
 «20» октября 20 14 г.
 аспирант
 _____ И.Ю. Маркова
 «22» октября 20 14 г.

Белгород 20 14 г.

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

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе,
д-р техн. наук, профессор
Е.И. Евтушенко
«27» октября 20 14 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на производство асфальтобетонов с использованием золобитумных вяжущих

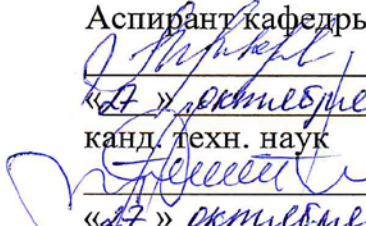
СОГЛАСОВАНО:

Директор ООО «Мостдорстрой»
А.А. Молчанов
«27» октября 20 14 г.



РАЗРАБОТАН:

Аспирант кафедры МиТМ
И.Ю. Маркова
«27» октября 20 14 г.
канд. техн. наук
Т.В. Дмитриева
«27» октября 20 14 г.
д-р техн. наук, профессор
В.В. Строкова
«27» октября 20 14 г.



Белгород 20 14 г.

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по научной работе
 д-р техн. наук, проф.
 Е.И. Евтушенко
 «14» апреля 20 15 г.



ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

При производстве дорожно-строительных композитов на протяжении долгих лет применяют дорожный битум. Однако, учитывая специфику свойств применяемого вяжущего, выраженную совокупностью физико-механических и реологических характеристик в последние годы получило широкое распространение использование модифицирующих добавок, позволяющих повысить его качество. В виду высокой стоимости добавок приобретает популярность применение техногенного сырья для расширения номенклатуры модификаторов битума.

В этой связи актуальным является использование техногенного сырья из отходов топливно-энергетических предприятий от сжигания твердого топлива в виде зол-уноса, выполняющих роль модифицирующих агентов битума, позволяющих увеличить рабочие температуры в летний период, а также теплостойкость дорожных композитов на его основе.

В связи с вышесказанным, мы нижеподписавшиеся, главный инженер ОГКУ «УпрДорТранс Белгородской области» А.И. Филоненко и д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Материаловедение и технология 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 верхнем слое покрытия асфальтобетона на основе золобитумного вяжущего, полученного согласно технологическому регламенту, разработанному к.т.н. Т.В. Дмитриевой и инженером ИНО и ОПЦ НКМ И.Ю. Марковой.

**От ООО ОГКУ «УпрДорТранс
 Белгородской области»**
 Главный инженер

А.И. Филоненко

От БГТУ им. В.Г. Шухова
 Зав. кафедрой МиТМ, д.т.н., проф.

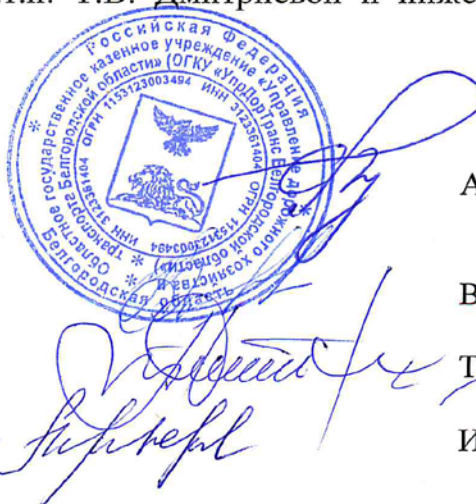
В.В. Строкова

Инженер каф МиТМ, к.т.н.

Т.В. Дмитриева

Инженер ИНО и ОПЦ НКМ

И.Ю. Маркова



Handwritten signature in blue ink.



Российская Федерация
БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ

Областное государственное
казенное учреждение
«УПРАВЛЕНИЕ
ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА И ТРАНСПОРТА
БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ОГКУ «УпрДорТранс Белгородской области»)

308000, г. Белгород, ул. Преображенская, 19
Тел. 27-13-60, факс: 32-62-77
E-mail: uprdor@belgtts.ru

№ _____
На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

главный инженер
ОГКУ «УпрДорТранс
Белгородской области»
А.И. Филоненко
20 15 г.

АКТ

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы
«Золобитумное вяжущее для асфальтобетонных смесей»
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук,
Марковой И.Ю.**

Мы нижеподписавшиеся, представитель ОГКУ «УпрДорТранс Белгородской области» главный инженер А.И. Филоненко, с одной стороны, и представители БГТУ им. В.Г. Шухова д-р техн. наук, профессор В.В. Строкова, канд. техн. наук Т.В. Дмитриева, инженер ИНО и ОПЦ НКМ И.Ю. Маркова, с другой стороны, составили акт о нижеследующем.

Результаты научно-исследовательской работы Марковой И.Ю. были внедрены при капитальном ремонте автомобильной дороги III категории «Крым – Октябрьский – Бессоновка» км 6+150 км 6+950 в Белгородском районе Белгородской области. Асфальтобетон на основе золобитумного вяжущего был использован в качестве верхнего слоя покрытия дорожной одежды на участке автодороги протяженностью 0,8 км.

От ООО ОГКУ «УпрДорТранс
Белгородской области»
Главный инженер

А.И. Филоненко

От БГТУ им. В.Г. Шухова
Зав. кафедрой МиТМ, д.т.н., проф.

В.В. Строкова

Инженер каф МиТМ, к.т.н.

Т.В. Дмитриева

Инженер ИНО и ОПЦ НКМ

И.Ю. Маркова



СПРАВКА
о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы И.Ю. Марковой «Золобитумные вяжущие для асфальтобетонных смесей», используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» профилю подготовки «Автомобильные дороги и аэродромы»; магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» профилей подготовки «Дорожно-строительное материаловедение», «Автомобильные дороги», «Материаловедение и технология материалов».

Зам. зав. кафедрой автомобильных и
железных дорог,
д-р техн. наук, профессор

В.В. Ядыкина

Зав. кафедрой материаловедения
и технологии материалов,
д-р техн. наук, профессор

В.В. Строкова