

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



КАЗАРЯН САМВЕЛ ОГАНЕСОВИЧ

**ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОНЫ,
МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПОРИСТЫМИ ПОРОШКОВЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Борисенко Юрий Григорьевич

Ставрополь, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВАХ ЩМА.....	12
1.1 Структура асфальтобетонов. Особенности структурообразования ЩМА.....	12
1.2 Состояние вопроса применения ЩМА за рубежом и в России.....	22
1.3 Стабилизирующие добавки для ЩМА.....	27
1.4 Опыт использования пористых материалов с составах асфальтобетонов и битумоминеральных композиций.....	31
1.5 Выводы, цели и задачи исследования.....	35
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ.....	37
2.1 Особенности взаимодействия битума с пористыми материалами.....	37
2.1.1 Движение жидкости в пористых телах.....	37
2.1.2 Адсорбционные процессы.....	41
2.1.3 Избирательная фильтрация.....	44
2.2 Пути повышения прочности и сдвигоустойчивости ЩМА.....	48
2.3 Выводы.....	52
3 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЕРАМЗИТОВЫМ ПОРОШКОМ.....	55

3.1 Материалы, принятые к исследованиям.....	55
3.2 Методы испытаний.....	60
3.2.1 Методы испытаний порошковых материалов.....	60
3.2.2 Методы испытаний стабилизирующих добавок.....	63
3.2.3 Методы испытаний вяжущего.....	64
3.2.4 Методы испытаний асфальтовяжущих	64
3.2.5 Методы испытаний ЩМА.....	64
3.2.6 Определение реологических характеристик ЩМА.....	65
3.2.7 Методы определения эксплуатационных характеристик ЩМА.....	67
3.3 Исследование особенностей топографии поверхности и дисперсности пористых порошковых материалов.....	69
3.4 Исследование свойств асфальтовяжущих.....	74
3.5 Составы ЩМА, принятые к исследованиям.....	76
3.6 Математическое планирование эксперимента.....	80
3.7 Влияние содержания керамзитового порошка на свойства ЩМА.....	91
3.7.1 Влияние содержания керамзитового порошка на плотность ЩМА.....	91
3.7.2 Влияние содержания керамзитового порошка на прочностные характеристики ЩМА.....	92
3.7.3 Влияние содержания керамзитового порошка на водостойкость ЩМА.....	93
3.7.4 Влияние содержания керамзитового порошка на сегрегацию ЩМАС.....	96
3.8 Исследование реологических параметров ЩМА.....	97
3.9 Исследование эксплуатационных свойств ЩМА.....	102
3.9.1 Исследование сдвигоустойчивости ЩМА.....	102
3.9.2 Исследование трещиностойкости ЩМА.....	103
3.9.3 Исследование морозостойкости ЩМА.....	104
3.9.4 Исследование износостойкости ЩМА.....	106

3.9.5 Исследование долговечности ЩМА.....	106
3.10 Выводы.....	109
4 ТЕХНОЛОГИЯ, ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО- МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЕРАМЗИТОВЫМ ПОРОШКОМ.....	111
4.1 Разработка технологии приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей.....	111
4.1.1 Влияние температуры перемешивания ЩМАС на физико- механические свойства ЩМА.....	111
4.1.2 Влияние последовательности введения в смеситель компонентов ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком, на физико- механические свойства ЩМА.....	113
4.1.3 Технология приготовления ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком.....	115
4.2 Конструкция дорожной одежды с покрытием из ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.....	117
4.3 Опытнo-промышленные испытания ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.....	117
4.4 Расчет экономического эффекта от производства и применения ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.....	122
4.5 Выводы	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Резко возросшая интенсивность движения автомобильного транспорта, усилившийся рост нагрузок на дорожное полотно, применение устаревших технологий, невысокое качество дорожно-строительных материалов снижают эксплуатационные характеристики дорожных покрытий, способствуют росту деформаций, трещин, колеиности, выбоин и др., что обуславливает снижение межремонтных сроков и долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий.

Прогрессивным направлением повышения качества покрытий автомобильных дорог является внедрение новых перспективных дорожно-строительных материалов, обладающих повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Одним из таких эффективных материалов является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА), который обладает повышенными физико-механическими характеристиками и долговечностью в сравнении с традиционными плотными мелкозернистыми асфальтобетонами.

Однако, при выполнении технологических операций при транспортировке и укладке щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС) происходит сегрегация (расслаивание) смеси под действием высоких температур и повышенного содержания битума. Проблема сегрегации щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей в настоящее время решается применением дорогостоящих стабилизирующих добавок. В процессе эксплуатации покрытий из ЩМА при определенных условиях (особенно в летний период) возможно появление битумных пятен, колеиности, что снижает прочностные свойства и сдвигоустойчивость дорожных одежд.

Повышение качества, совершенствование составов и технологии щебеночно-мастичных асфальтобетонов являются одними из актуальных проблем. Перспективным направлением их решения может быть применение в составах ЩМАС пористых порошковых минеральных материалов, обладающих высокой адсорбционной и структурирующей способностью по отношению к битуму, что может способствовать обеспечению устойчивости щебеночно-

мастичной смеси к сегрегации и существенному повышению качества щебеночно-мастичных асфальтобетонов. Одним из важнейших аспектов применения пористых порошковыми материалами (например керамзитового порошка) в составе ЩМАС является замена дорогостоящих зарубежных стабилизирующих добавок в смеси на предложенные материалы, что в сложной экономической ситуации в России и санкционной политике будет способствовать решению задач по импортозамещению в отрасли дорожного строительства.

Степень разработанности темы исследования. Работа основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований ученых в области асфальтобетонов: Богуславского А.М., Волкова М.И., Гезенцвея Л.Б., Горельшева Н.В., Калгина Ю.И., Ковалева Я.Н., Колбановской А.С., Королева И.В., Котлярского Э.В., Печеного Б.Г., Ребиндера П.А., Руденского А. В., Рыбьева И.А., Сахарова П.В., и других ученых.

В работе использованы результаты теоретических и экспериментальных исследований структуры, свойств, составов и технологии щебеночно-мастичных асфальтобетонов и битумоминеральных композиций с применением пористых заполнителей и наполнителей отечественных и зарубежных ученых: Арутюнова В., Атояна С.М., Борисенко Ю.Г., Высоцкой М.А., Горельшевой Л.А., Иллиополова С.К., Кирюхина Г.Н., Костина В.И., Кузнецова Д.К., Куцыной Н.П., Мардиросовой И.В., Пачернина А.С., Салминена Э.О., Смирнова Е.А., Щербакова А.М., Щербины П.С., Юмашева В. М., Ядыкиной В.В., Ярцева В.П., Korner M., Horst E., Werner M., Milster R., GroBhans D., Pohlmann P.

Цель исследования: теоретическое и экспериментальное обоснование возможности получения щебеночно-мастичных асфальтобетонов, модифицированных пористыми порошковыми материалами с повышенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками путем управления процессами структурообразования битумных связующих.

Задачи исследования:

– на основании критического анализа зарубежной и отечественной научной, патентной и технической литературы обосновать целесообразность применения

пористых порошковых материалов в составах щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей для обеспечения повышения качества ЩМА и снижения сегрегации смеси;

- выявить особенности топографии, микроструктуры и дисперсности исследуемых пористых порошков;

- установить влияние различных пористых порошков на структурообразование асфальтовяжущих щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и на свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов и обосновать выбор керамзитового порошка, как наиболее эффективного модификатора ЩМА;

- на основании экспериментальных исследований выявить закономерности влияния содержания керамзитового порошка в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях на физико-механические, структурно-механические и эксплуатационные свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов;

- разработать рациональные составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком;

- разработать оптимальную технологию приготовления высококачественных щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком;

- провести опытное внедрение разработанных щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и оценить технико-экономическую эффективность ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.

Объектом исследования являются щебеночно-мастичные асфальтобетоны, модифицированные пористыми порошковыми материалами (керамзитовым порошком).

Предметом исследования являются составы, свойства и технология щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, пункту 1

«Разработка теоретических основ получения различных строительных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств» и пункту 7 «Разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности».

Научная новизна работы:

– установлены на микроуровне особенности зернового состава, топографии, микроструктуры поверхности и повышенная дисперсность керамзитового порошка, обеспечивающие высокую адсорбционную активность и структурирующую способность битумного вяжущего, что позволяет управлять процессами структурообразования щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и применять его как эффективную добавку для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей;

– установлены зависимости влияния содержания керамзитового порошка C_k в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях на физико-механические и эксплуатационные свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов;

– выявлено рациональное содержание керамзитового порошка в составах щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, обеспечивающее получение щебеночно-мастичных асфальтобетонов с повышенными физико-механическими, структурно-механическими и эксплуатационными свойствами;

– установлены оптимальная температура объединения битумного вяжущего и минеральной части щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и рациональная последовательность введения компонентов при приготовлении смеси и разработана технология производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны оптимальные составы и технология приготовления горячих щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком, с повышенными физико-механическими, эксплуатационными свойствами и устойчивых к расслаиванию.

На АБЗ ООО «Джули» летом 2013 года была выпущена опытно-промышленная партия ЩМА-15 на битуме марки БНД 60/90 с применением керамзитового порошка и уложена в г. Ставрополе по пр. Кулакова. Экономический эффект от снижения себестоимости производства ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком, в сравнении со стандартными ЩМА-15 составил 1707 руб. на 100 м² в ценах 2017 года.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, используются в учебном процессе ФГАОУ ВО СКФУ в лекционных курсах, на лабораторных и практических занятиях по дисциплинам: «Дорожно-строительные материалы и конструкции» для направления подготовки 08.03.01 Строительство (профиль «Автомобильные дороги»), «Строительные материалы», для направления подготовки 08.03.01 Строительство (профилей «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство»), «Покрытия и кровли» для специальностей 270102.65 (профиль «Промышленное и гражданское строительство»).

Методология и методы исследования. В работе использовали стандартные и нестандартизированные методы исследований (методы атомно-силовой и растровой электронной микроскопии, метод лазерной дифракции, экспресс метод оценки долговечности асфальтобетонов).

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое и экспериментальное обоснование возможности получения высококачественных щебеночно-мастичных асфальтобетонов путем модификации пористыми порошковыми материалами;
- разработка оптимальных составов щебеночно-мастичных асфальтобетонов, модифицированных керамзитовым порошком, устойчивых к сегрегации вяжущего в смеси, с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами;
- результаты экспериментальных исследований физико-механических, структурно-механических и эксплуатационных свойств модифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов различных марок;

– технология приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком, повышенного качества.

Степень достоверности результатов исследований подтверждена применением стандартных и нестандартизированных методов исследований, статистической обработкой полученных данных, обеспечивающей доверительную вероятность 0,95, экспериментальной и опытно-промышленной проверкой результатов исследований, а также согласованностью основных положений работы с результатами исследований других авторов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV, XL, XLI научных конференциях «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону», СевКавГТУ (Ставрополь, 2010-2011); РИЦ БашГУ (Уфа, 2014); международной научно-технической конференции. «Композиционные строительные материалы. Теория практика», Приволжский Дом знаний (Пенза, 2014); всероссийской научно-технической конференции «Высокотехнологичные и энергоэффективные технологии и материалы в строительстве», ДГТУ (Махачкала, 2014); Всероссийской научной конференции «Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации», ВГАСУ (Воронеж, 2014); III, V ежегодных научно-практических конференциях Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону», СКФУ (Ставрополь, 2015, 2017), IV всероссийский дорожный конгресс «Перспективные технологии в строительстве и эксплуатации автомобильных дорог», МАДИ (Москва, 2015).

В июле 2013 года на АБЗ ООО «Джули» г. Ставрополе была выпущена опытная партия щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси марки ЦМА-15, модифицированной керамзитовым порошком, и уложена в дорожное покрытие в г. Ставрополе по пр. Кулакова.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и основной гипотезы, самостоятельном выполнении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и интерпретации экспериментальных данных, сравнении

результатов теоретических исследований с опытными данными, обобщении результатов и производственном внедрении разработанных составов.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 21 научная работа, из них 3 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях и журналах, включенных в перечень ВАК РФ, по результатам исследований получен патент РФ на изобретение (Патент RU № 2603310).

Объём и структура работы. Работа изложена на 158 страницах, содержит 116 страниц машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 176 наименований и 3 приложений. Текст диссертации содержит 39 таблиц и 25 рисунков.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВАХ ЩМА

1.1 Структура асфальтобетонов. Особенности структурообразования ЩМА

Объемы производства асфальтовых материалов занимают одно из ведущих мест среди всех видов строительных материалов. Около 80 % выпускаемой в России асфальтобетонной смеси используется для устройства дорожных покрытий, остальные 20 % применяются в промышленном и гражданском строительстве [1]. Покрытия из асфальтобетона составляют большую часть от протяженности всех автомобильных дорог, имеющих твердое покрытие [2]. Для обеспечения надежного функционирования дорожных сетей и строительства новых необходимо улучшение качества дорожных покрытий, снижение стоимости производства и укладки асфальтобетонов, повышение долговечности, увеличение межремонтных сроков и сокращение расходов на ремонт и содержание автомобильных дорог.

Асфальтобетон – это материал, полученный в результате уплотнения асфальтобетонной смеси, приготовленной в смесителях в нагретом состоянии из щебня или гравия, песка, минерального порошка и битума, подобранных в рациональных соотношениях [3-5].

Изучению теории, структуры, свойств, составов и технологии асфальтобетонов посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. В работах Богуславского А.М., Волкова М.И., Гезенцева Л.Б., Горелышева Н.В., Королева И.В., Печеного Б.Г., Ребиндера П.А., Руденского А. В., Рыбьева И.А., Сахарова П.В. и других ученых раскрываются вопросы проектирования составов, технологии производства и применения асфальтобетонов в дорожном, промышленном и гражданском строительстве, а также разработаны основополагающие принципы теории асфальтобетона [4, 6-26].

Свойства асфальтобетона определяются его структурой. Изучению структуры асфальтобетона и его свойств, а также установлению их взаимосвязи посвящены работы Ковалева Я.Н., Котлярского Э.В., Рыбьева И.А. и др. [27-29]. Согласно исследованиям процессов изменения свойств материалов, обладающих конгломератным типом структуры, Рыбьевым И.А. [27] были выдвинуты основные положения структурообразования искусственных строительных конгломератов. Одно из этих положений гласит, что существует «закономерность в общем виде между прочностными показателями искусственного конгломерата и его вяжущим веществом при оптимальных структурах». К одному из преимуществ оптимальных структур можно отнести их подобие между собой. Если соблюдено условие оптимальности структур, то закономерность, обоснованная в отношении какого-либо материала, может быть распространена и на другие. При рационально подобранном составе (при котором структура является оптимальной) возможно запроектировать материал, свойства которого вполне будут отвечать требуемым характеристикам в современных условиях производства и эксплуатации [30, 31].

Структура асфальтобетона, ее признаки, характеризующие строение, расположение компонентов в смеси относительно друг друга в пространстве, механизм взаимодействия между ними, зависят от плотности и пористости минерального остова и непосредственно самого асфальтобетона, структуры и количества вяжущего вещества. Структура минерального остова определяется расположением отдельных минеральных частиц, их текстурой, размером и формой. Все предложенные методы расчета оптимальных структур и составов минеральной части асфальтобетона сводятся к единой цели – создание более плотных асфальтобетонных смесей, имеющих минимальный объем пор, заполняющихся асфальтовой мастикой [32-36].

Структура асфальтобетона зависит от количества и формы порового пространства. Учитывая, что асфальтобетон имеет несколько фаз по однородности, он не может считаться конгломератом с однородным типом структуры [27, 32, 37].

В работе В.И. Соломатова структура композиционных материалов представлена как состоящая из нескольких структур (начиная с грубых макроструктур, заканчивая молекулярными и атомарными), которые перетекают из одной в другую по принципу «структура в структуре» [38]. Данный способ эффективен для определения источников возникновения неоднородностей в микроструктуре асфальтобетона [39].

Процесс образования битумоминеральных структур во многом зависит от характера взаимодействия битума с минеральной частью (заполнителем и наполнителем) [40-44]. Составляющие части асфальтобетона в процессе формирования в единую монолитную конструкцию сохраняют свои изначальные свойства, так как взаимодействие твердых и жидких компонентов происходит на границе раздела фаз [37].

Асфальтобетон – это композиционный материал, составляющие компоненты которого могут быть представлены в виде самостоятельных систем [45-47]. Можно выделить три типа структур в конгломерате: макроструктура (щебень + асфальтовый раствор), мезоструктура (песок + асфальтовязущее), микроструктура (минеральный порошок + битум). Данная классификация позволяет установить, какое влияние оказывают щебень и вяжущее на образование структуры асфальтобетона и его прочность, а также выявить три типа макроструктуры: базальную, поровую и контактную [45-47].

По мнению Ребиндера П.А. и Михайлова Н.В. стабильность структуры органоинеральных композиций зависит от качества энергетической связи на границе раздела фаз твердых и жидких компонентов. Следовательно, структуру асфальтобетонов по характеру взаимодействия связей между отдельными составляющими можно разделить на коагуляционную, конденсационную и кристаллизационную.

Характер структуры асфальтобетона зависит не только от структур минерального остова и битума, но и от механизма их влияния друг на друга, от плотности асфальтобетона, специфики его капиллярно-поровой структуры [34]. На формирование структуры асфальтобетона влияют количество и соотношение

щебня, песка и минерального порошка. Отличия в структуре существенным образом изменяют свойства асфальтобетона. Контролируя гранулометрический состав и структуру асфальтобетона, вполне возможно регулировать и его свойства, изменяя их в широких пределах [48, 49].

Н.В. Горелышев [50], рассматривая соотношение компонентов в минеральной части асфальтобетонной смеси, разделил структуру асфальтобетона на типы: каркасный, полукаркасный и бескаркасный.

Большую роль для получения оптимальной структуры асфальтобетона играет пространственная упаковка зерен. В работе [51] отмечено, что создание максимально плотного асфальтобетона возможно путем использования в его составе зерен щебня по форме близкой к гексагональной и, в этом случае, каждая частица щебня контактирует с двенадцатью другими.

Получение заданных технологических и строительно-технических свойств асфальтобетона, по мнению И.В. Королева [33], возможно при соблюдении следующих принципов: разрушение начальных атомных связей между минеральными частицами и обволакивание их пленкой битума заданной толщины; строгое соблюдение заданной вязкости системы на всех стадиях структурообразования; выбор технологии, при которой в исходном материале уменьшилось бы количество «природных» дефектов и исключалось появление «наведенных» дефектов в асфальтовых системах. Следуя принципам структурообразования битумо-минеральных композиций, щебеночных и песчаных смесей, возможно прогнозирование характера и природы явлений, происходящих на границе раздела фаз дисперсных систем [33]. Если учесть, что образование структуры асфальтобетона, установление связей между его отдельными составляющими происходит на всех технологических этапах, начиная с перемешивания и заканчивая укладкой и уплотнением [35, 52-54], то положения теории Королева В.И. [33] становятся особенно актуальными. При перемешивании материала на поверхности щебня образуются структурированные оболочки вяжущего (битумные пленки). Вязкость, пластичность и когезионная прочность вяжущего меняются в процессе удаления от минеральной подкладки и

зависят от степени пористости минеральных компонентов, обуславливающей «фильтрационный эффект», и от количества структурированного битума [55-57].

Изучение специфики образования структуры высококонцентрированных дисперсных систем создает необходимость учета свойств контактных взаимодействий, так как на объемные свойства асфальтобетонов сильно оказывают влияние количественные и качественные характеристики, механизм взаимодействия между частицами грубо- и высокодисперсных фаз сквозь тонкую пленку битума [27, 46, 55, 59-63].

Толщина битумных пленок на поверхности минеральных зерен различна, от долей микрометра до нескольких микрометров. Создание на поверхности минеральных зерен адсорбционно-сольватных оболочек способствует повышению физико-механических и эксплуатационных свойств, улучшению однородности структуры конгломерата. Этого можно добиться путем введения в асфальтобетонную смесь оптимального количества минерального порошка, который обладает высокой структурирующей способностью [64].

Структура и свойства конгломератов из битумоминеральных смесей зависят от следующих факторов: качества связей, действующих между отдельными минеральными частицами; свойств вяжущего; толщины слоя на поверхности щебня; механизма взаимодействия минеральной части и вяжущего на границе раздела фаз. Для повышения качества дорожных покрытий необходимо использование дорожно-строительных материалов, которые обладают плотной и однородной структурой, водонепроницаемостью, устойчивостью к сдвиговым деформациям и трещинообразованию, высокой износостойкостью. Одним из таких материалов является щебеночно-мастичный асфальтобетон.

Щебеночно-мастичной асфальтобетонной смесью (ЩМАС) называется рационально подобранная смесь минеральных материалов (щебня, песка из отсевов дробления и минерального порошка), дорожного битума и стабилизирующей добавки, взятых в определенных пропорциях и перемешанных в нагретом состоянии.

Щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) – это материал, разработанный преимущественно для устройства верхних слоев дорожной одежды на участках с высокой интенсивностью движения транспорта.

По своему структурному строению, по соотношению и содержанию компонентов смеси, ЩМА довольно сильно отличается от других типов асфальтобетона, поэтому его относят к самостоятельному виду дорожно-строительных материалов.

Отличием ЩМА от традиционных типов асфальтобетона (мелкозернистые асфальтобетоны типа А, Б, многощебенистые асфальтобетоны) является жесткая каркасная структура, благодаря которой передача нагрузки непосредственно с поверхности покрытия на нижележащие слои осуществляется через отдельные крупные частицы щебня, соприкасающиеся между собой. Именно поэтому, щебеночно-мастичный асфальтобетон менее подвержен деформациям в продольном и поперечном направлениях [73]. Нагрузки, воздействующие на слой ЩМА, воспринимаются отдельными зернами щебня, что и способствует повышению сдвигоустойчивости покрытия. Однако, чрезмерные нагрузки приводят к повышению внутренних напряжений, что может привести к разрушению щебня.

Одним из основных отличий ЩМА от стандартных асфальтобетонов является его гранулометрический состав. Как правило, зерновой состав традиционных асфальтобетонов подбирают таким образом, чтобы обеспечить наибольшую плотность уплотняемого материала. Для ЩМА это правило не работает – некоторые фракции могут быть пропущены, а пространство между крупным щебнем заполняется мастикой, состоящей из дробленого песка, наполнителя, битума и стабилизирующей добавки.

В России щебеночно-мастичные асфальтобетоны по крупности щебня подразделяют на 3 основные марки: ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20. За рубежом широко распространены марки ЩМА с максимальным размером щебня 8, 10, 11, 16, 22 мм. ЩМА рекомендуется применять при устройстве верхних слоев дорожной одежды на дорогах любых категорий и городских улицах в I-V

климатических зонах, а также на аэродромах при устройстве взлетно-посадочных полос и в местах стоянки воздушных судов. Толщину устраиваемого слоя в зависимости от марки ЩМА назначают в пределах от 3 до 6 см.

При проектировании щебеночно-мастичных асфальтобетонов минеральную часть смеси подбирают исходя из принципа прерывистой гранулометрии.

В отличие от асфальтобетона типа А и высокоплотного асфальтобетона, минеральная часть которых включает в себя около 50-65 % щебня с размером зерен выше 5 мм, ЩМА характеризуется повышенным содержанием щебня (70 - 80 % по массе), приближенным к кубовидной форме, для получения более устойчивого каркаса в уплотненном слое дорожного покрытия. Общее же количество дробленого материала в ЩМА может достигать 95 %.

ЩМА по своим физико-механическим показателям существенно отличается от других типов асфальтобетона. По сравнению с асфальтобетоном типа А и высокоплотным асфальтобетоном (ВПА) пористость минерального остова щебеночно-мастичного асфальтобетона выше и увеличивается пропорционально содержанию битума. Плотный асфальтобетон и ВПА ведут себя согласно правилу створа [3, 74], имея оптимальное содержание битумного вяжущего при минимальной пористости минерального остова. В случае с ЩМА повышение количества вяжущего ведет к увеличению пористости минерального остова. В результате экспериментальных исследований было выявлено, что сама по себе структура ЩМА предусматривает раздвижку минерального остова и присутствие в уже уложенном покрытии, в уплотненном материале, слабоструктурированного и объемного битума. Толстые пленки битума на поверхности щебня в щебеночно-мастичном асфальтобетоне делают его несколько схожим с литым асфальтобетоном [75], но данные материалы существенно отличаются по содержанию щебня, поровой структуре, степени структурирования с минеральным порошком.

Объемный битум увеличивает деформативность ЩМА при растяжении. Однако наличие такого количества объемного битума неизбежно влечет за собой резкое снижение когезионной прочности материала. Наиболее ярко это

проявляется при положительных температурах. Учитывая выше сказанное, логично предположить, что ЩМА будут иметь относительно не высокий предел прочности при сжатии. Это подтверждается и экспериментальными данными. Наличие объемного битума в щебеночно-мастичном асфальтобетоне несколько снижает показатель когезионного сцепления при сдвиге при температуре 50 °С. Этот показатель у ЩМА ниже, чем у асфальтобетона типа А. Так как к дорожным и аэродромным покрытиям предъявляются высокие требования к сдвигоустойчивости, то не высокий показатель когезионного сцепления в ЩМА компенсируется довольно высоким и стабильным внутренним трением минерального остова в материале покрытия. Коэффициент внутреннего трения у асфальтобетона типа А существенно и устойчиво снижается при повышении содержания вяжущего, в то время как у щебеночно-мастичного асфальтобетона он не зависит от этого фактора и значительно выше по абсолютному значению [76]. Это обеспечивает требуемые сдвигоустойчивость и высокие эксплуатационные характеристики ЩМА.

Таким образом, при правильно и рационально подобранном составе, ЩМА имеет устойчивый и стабильный минеральный остов. Структура щебеночно-мастичных асфальтобетонов наиболее оптимально сочетает в себе максимальную жесткость при трехосном сжатии и сдвиге, максимальную податливость и высокую деформативность при растяжении.

Щебеночно-мастичный асфальтобетон предполагает наличие в смеси следующих составляющих: щебня из прочных горных пород с улучшенной кубовидной формой зерен, объемного битума и стабилизирующей добавки. Объемным (свободным) битумом считается та часть вяжущего, которая менее или вообще не подвержена структурирующему влиянию поверхностных сил, которые действуют на границе раздела фаз.

Одним из важнейших и основных элементов структуры асфальтобетона является щебень. Щебень, используемый в щебеночно-мастичных асфальтобетонах, должен быть из плотных, прочных, трудно шлифуемых пород, обладающих хорошим сцеплением с вяжущим. По форме зерен используемый

щебень должен относиться к 1 или 2 группе, а общее содержание зерен игольчатой и лещадной (пластинчатой) формы не должно быть выше 15 %. Содержание дробленых зерен в применяемом щебне из гравия должно быть не менее 85 % по массе.

Основную структуру ЩМА составляет крупный щебень от 5 мм и выше, а фракции с размером зерен менее 5 мм вместе с наполнителем, вяжущим и стабилизирующей добавкой представляют собой мастику, которая плотно заполняет все остальное пространство и поры. Так как в ЩМА природный песок отсутствует, то под действием внешних нагрузок частицы щебня не перемещаются, заполняя при этом свободное пространство, подобно асфальтобетону типа А, а разрушаются [77]. Для предотвращения этого процесса, а также для более качественного уплотнения в щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси необходимо создать как можно более толстые пленки битума на поверхности каждой отдельно взятой частицы щебня. Это требует увеличения количества битума в ЩМАС от 5,5 до 7,5 % [78]. Для того, чтобы такое количество горячего вяжущего в процессе приготовления, хранения, транспортировки и укладки находилось на поверхности щебня и не вытекало из смеси необходимо присутствие в составе ЩМА стабилизирующих добавок. Стабилизаторы оказывают структурирующее влияние на вяжущее и смесь в целом, препятствуют отслоению (стеканию) и сегрегации битума на всех технологических этапах, улучшают однородность смеси [79]. В настоящее время в составах ЩМА широко применяются добавки, состоящие из целлюлозных волокон или гранул на основе целлюлозы.

Для приготовления ЩМА принято использовать битумы нефтяные дорожные вязкие (БНД), удовлетворяющие требованиям ГОСТ 22245-90, или полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) по ГОСТ Р 52056-2003. В составе щебеночно-мастичных асфальтобетонов, в независимости от условий применения, следует использовать вяжущие с наиболее высокой адгезией к поверхности применяемого щебня. Высокое содержание битума в смеси позволяет добиться лучшего уплотнения, а так же снизить вероятность

разрушения зерен щебня при передаче нагрузки на нижележащие слои дорожной конструкции.

Для производства щебеночно-мастичных асфальтобетонов применяют песок из отсеков дробления горных пород с заданным гранулометрическим составом, соответствующий требованиям ГОСТ Р 8736-93.

Минеральный порошок должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 52129-2003. При соответствующем технико-экономическом обосновании допускается применять взамен минерального порошка пыль из системы пылеулавливания смесительной установки в таком количестве, чтобы содержание ее в зернах мельче 0,071 мм было не более 50 % по массе. Содержание глинистых частиц в пыли улавливания, определяемое методом набухания, должно быть не более 5,0 % по массе.

Требования ГОСТ 31015-2002 предъявляемые к показателям физико-механических свойств ЩМА представлены в таблице 1.1.

По сравнению с традиционными асфальтобетонами, которые имеют плотную многоуровневую структуру, ЩМА характеризуется каркасно-щелевой структурой, благодаря чему имеет ряд преимуществ, а именно: высокие сдвигоустойчивость, трещиностойкость, устойчивость к разрушениям под действием транспорта и климатических факторов, повышенный срок службы покрытий, более высокие эксплуатационные характеристики, а также пониженный уровень шума при движении транспорта [80-90].

Покрытия из ЩМА обладают безопасными ездовыми качествами, являются комфортабельными, а благодаря своей текстуре и шероховатости отлично поглощают шум при движении транспорта. В результате исследований во многих странах выявлено, что покрытие из щебеночно-мастичного асфальтобетона, по сравнению с обычным асфальтобетоном, снижает уровень шума при движении транспорта на 2-4 Дб [77, 87, 88].

Так как ЩМА является более долговечным материалом и менее подвержен разрушениям в сравнении другими дорожно-строительными материалами, то даже при больших изначальных затратах на производство и укладку, в будущем

он является более рентабельным и экономичным. Стоимость изготовления ЩМА более высока в связи с тем, что при его производстве используется большее количество битума, заполнитель высокого качества и стабилизирующие добавки.

Таблица 1.1 – Показатели физико-механических свойств ЩМА согласно ГОСТ 31015-2002

Наименование показателя	Значение показателя для дорожно-климатических зон		
	I	II, III	IV, V
Пористость минеральной части, $V_{\text{пор}}^{\text{м}}$, %	15 - 19	15 - 19	15 - 19
Остаточная пористость, $V_{\text{пор}}^{\text{о}}$, %	1,5 - 4,0	1,5 - 4,5	2,0 - 4,5
Водонасыщение, W , % по объему: образцов, отформованных из смесей	1,0 - 3,5	1,0 - 4,0	1,5 - 4,0
Предел прочности при сжатии, R , МПа, не менее:			
при температуре 20 °С	2,0	2,2	2,5
при температуре 50 °С	0,60	0,65	0,70
Сдвигоустойчивость:			
коэффициент внутреннего трения, $\text{tg}\varphi$, не менее	0,92	0,93	0,94
сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, МПа, C_{π} , не менее	0,16	0,18	0,20
Трещиностойкость: предел прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С, R_p , МПа:			
не менее	2,0	2,5	3,0
не более	5,5	6,0	6,5
Водостойкость при длительном водонасыщении, $k_{\text{вод}}$, не менее	0,90	0,85	0,75

Однако, учитывая то, что покрытие из ЩМА долговечнее покрытия из асфальтобетона в 2-3 раза, толщина укладываемого слоя меньше, а межремонтные сроки значительно больше, то экономическая эффективность применения ЩМА очевидна.

1.2 Состояние вопроса применения ЩМА за рубежом и в России

Щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) был создан в конце 60-х годов прошлого столетия. ЩМА появился как результат борьбы немецких

специалистов с повышенным колееобразованием и разрушением дорожной одежды в результате использования автомобилистами большого количества ошипованных шин в зимний период. ЩМА сразу продемонстрировал высокие эксплуатационные качества и с 1984 года стал национальным стандартом ФРГ (ZTV Asphalt-StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt) [79, 176].

В настоящее время в большинстве стран мира устройство дорожных покрытий с использованием щебеночно-мастичного асфальтобетона развивается быстрыми темпами. ЩМА широко используется в качестве верхнего слоя покрытия при устройстве дорог, мостов, в речных портах и на аэродромах в Норвегии, США, Китае, ЮАР, Финляндии, Канаде, Швеции, Германии, Франции и других странах [77, 80, 89].

В Австралии на дорогах с высокой интенсивностью движения транспорта вместо обычных асфальтобетонов «открытого» типа рекомендуется применять ЩМА, как более износостойкий, качественный и устойчивый к воздействию окружающей среды и возникающим внешним нагрузкам материал.

В США щебеночно-мастичные асфальтобетоны используются с начала 90-х годов. Уже в 1997 году было успешно реализовано более 100 проектов в 28 штатах, а к 2002 году – свыше 250 проектов и произведено более 15 млн. т. смеси. В период с 1994 по 1997 год исследовано состояние около 100 участков автомобильных дорог в 20 штатах. Проведено сравнение ЩМА с традиционными асфальтобетонами по таким характеристикам, как трещиностойкость, сопротивление к образованию колеи, неровности, образование битумных пятен [90]. Установлено, что ЩМАС могут изготавливаться без каких-либо особых проблем и в циклических смесителях и при помощи установок непрерывного действия.

подавляющее большинство объемов ЩМА было приготовлено с применением в качестве стабилизирующей добавки целлюлозных волокон, в меньшей мере использовались гранулы на основе целлюлозы. Участки дорог обследовали на наличие колеи. В 90 % случаев глубина колеи составляла не

более 4 мм, примерно 65 % - менее 2 мм, а на 25 % участках колей и вовсе отсутствовала. Покрытия из ЩМА показали высокие эксплуатационные характеристики (особенно на высоконагруженных участках дорог) – высокое сопротивление трещинообразованию и образованию колеи.

Недостатком применения ЩМА является появление битумных пятен на поверхности покрытия после уплотнения. Это говорит о высоком содержании вяжущего и недостаточной стабилизирующей способности использовавшихся добавок.

В Западной Европе наблюдается постепенный переход к устройству тонких защитных слоев из щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

Устройство тонких слоев покрытий из ЩМА было проведено в Нидерландах, Германии. Построенные тонкие покрытия из ЩМА, даже после 11 лет эксплуатации показали удовлетворительные результаты [91].

ЩМА так же хорошо зарекомендовал себя и при ремонте цементобетонных покрытий на автобанах в Баварии [92].

Помимо использования щебеночно-мастичного асфальтобетона непосредственно при строительстве автодорог, он также нашел широкое применение при строительстве взлетно-посадочных полос в аэропортах в Швеции, Германии, Австрии, Бельгии, Англии, Австралии, США и странах Азии. Это стало возможным благодаря высокой деформационной стойкости ЩМА, высокой долговечности покрытий, а также высокому коэффициенту трения при взлете или посадке воздушных судов.

ЩМА применяется при строительстве мостовых и других сооружений. Это возможно исходя из свойств данного материала: повышенная трещиностойкость, низкая водопроницаемость, возможность укладки тонкими слоями, ровность, высокий коэффициент сцепления.

Распространено устройство двухслойных покрытий из ЩМА при строительстве мостов. Примерами могут служить «Великий Мост» в г. Сеохай (Южная Корея), мост через р. Иртыш в г. Ханты-Мансийске и т. д.

В России щебеночно-мастичные асфальтобетоны используются с начала 2000-х годов [83]. В 2000 г. были построены первые экспериментальные участки на дорогах М-4 «Дон» (км 117+600 - км 119), М-1 «Беларусь» (228 км), Носовихинском шоссе (16 км), улице Чехова в г. Альметьевске. В 2001 г. строительство верхних слоев покрытий из ЩМА было продолжено на участках автомобильных дорог МКАД - Кашира (96-105 км), МКАД - Железнодорожный - Ликино (2-7 км и 18-20 км), также на мостах через реку Обь в г. Ханты-Мансийске, Новосибирске и на стоянке воздушных судов в аэропорту Шереметьево.

В 2002 г. участки покрытий из ЩМА строили в странах СНГ (Украина, Белоруссия и др.) [84-86, 93]. В 2003 - 2004 годах в России заметно выросли объемы производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Покрытия из ЩМА были уложены в различных регионах страны. В 2004 г. ЩМА стали применять в городских условиях.

Увеличение объемов строительства дорог в России с применением ЩМА говорит о его высоких физико-механических и эксплуатационных качествах, которые были выявлены в ходе опытного строительства.

Регулярные обследования автомагистрали «Дон» показали отличное состояние построенных участков дорожного полотна из ЩМА: высокие показатели сдвигоустойчивости, шероховатости, трещиностойкости, сцепления поверхности с колесом автомобиля, устойчивости к старению и водонепроницаемости [83].

За период строительства и эксплуатации покрытий из ЩМА были опробованы щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси (ЩМАС) с максимальным размером минеральных зерен 10, 15 и 20 мм [83].

В качестве вяжущих использовались битумы нефтяные дорожные марок БНД 60/90, БНД 90/130, БН 90/130, БДУ 70/100, а так же полимерно-битумное вяжущее ПБВ 60. Были построены дорожные покрытия, в составе которых применялись щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси как с использованием добавок катионного типа, так и без них [94].

Обследование построенных участков из ЩМА показало, что ширина раскрытия трещин в сравнении с покрытием из асфальтобетона типа А, оказалась в 1,5-2 раза меньше. Имеющиеся поперечные трещины летом становились визуально незаметными, однако в осенний период они снова раскрывались [83].

Сдвигоустойчивость ЩМА обеспечивается благодаря высокому показателю внутреннего трения. По данным измерений ровности покрытия в поперечном направлении даже в аномально жаркие периоды 2001-2002 гг. колея в покрытии не образовывалась. Согласно результатам исследования [95] показатели ровности на экспериментальном участке дороги из ЩМА выше предельного 95%-ного значения.

Приготовление и укладка ЩМАС является технологичным и экономичным процессом, не требующим никаких особых дополнительных устройств и при этом не возникает никаких технологических сложностей при строительстве дорог [95, 96].

Участки дорог из ЩМА, построенные в климатических зонах Западной Сибири, имеют после зимнего периода эксплуатации гораздо лучшее состояние, чем участки асфальтобетонной смеси, изготовленной по ГОСТ 9128-2013.

В ходе исследования эксплуатационных характеристик опытных участков покрытий из щебёночно-мастичного асфальтобетона, а так же на участках из асфальтобетона типа А, которые были введены в эксплуатацию в 2000 и 2001 гг. на автомобильной дороге М-4 «Дон», выявлено следующее [83]: высокий коэффициент внутреннего трения щебёночно-мастичного асфальтобетона, равный 0,94 - 0,95, при коэффициенте вариации от 1,0 до 1,6 %; высокая сдвигоустойчивость покрытия из ЩМА и отсутствие колеяности. Для асфальтобетона типа А коэффициент внутреннего трения был равен 0,90, коэффициент вариации 2,5 %. Согласно проведенным обследованиям покрытия из ЩМА имеют следующие преимущества по сравнению с асфальтобетоном типа А [83]:

- на всем протяжении экспериментальных участков на поверхности отсутствуют выбоины, шелушение, выкрашивание;

- ширина раскрытия трещин, отраженных от основания на поверхности ЩМА, в 1,5-2 раза меньше по сравнению с покрытиями из асфальтобетона типа А;
- согласно обследованию показатель водонасыщения ЩМА в покрытии не превышал 1,5 %, что позволяет считать верхний слой на экспериментальных участках водонепроницаемым;
- высокая устойчивость ЩМА к эрозионным разрушениям обуславливается достаточно высокими значениями водостойкости при длительном водонасыщении;
- шероховатость покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонов в 1,8 раз выше, чем в покрытиях из асфальтобетонов типа А той же крупности;
- коэффициент сцепления колеса автомобиля с поверхностью дороги выполненной из ЩМА выше, чем на участке покрытий из традиционного асфальтобетона и находится в пределах 0,43-0,48;
- во время эксплуатации экспериментальных участков дорожного покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона, протяженность которых составляла более 50 км, были отмечены высокие и стабильные показатели ровности.

Исходя из вышеизложенных преимуществ экспериментальных покрытий, построенных из ЩМА, можно прогнозировать их более высокую долговечность, так как по основным эксплуатационным показателям качества они на много превосходят стандартные плотные асфальтобетоны типа А.

1.3 Стабилизирующие добавки для ЩМА

Особенностью ЩМА является то, что в их составах применяются стабилизирующие добавки.

Стабилизирующая добавка является важнейшим компонентом в составе ЩМА и оказывает структурирующее влияние на смесь, предотвращает сегрегацию и отслоение (стекание) битума при высоких технологических температурах на всех этапах производства и укладки [142]. Вид и свойства

используемых добавок играют важную роль для обеспечения необходимого содержания вяжущего и повышения качества смеси.

Стабилизирующие добавки применяют для увеличения толщины пленок битума на поверхности минеральных зерен, тем самым повышая количество свободного битума и обеспечивая однородность смеси.

В качестве стабилизирующих добавок изначально применяли асбест и резиновую крошку, что обуславливает содержание битума в щебеночно-мастичных асфальтобетонах до 7 % [143]. В процессе экспериментальных исследований было установлено, что способностью удерживать битум на поверхности минерального материала обладают и такие материалы, как термопласты, целлюлозные и минеральные волокна и т.п.

На сегодняшний день наиболее распространенными являются стабилизирующие добавки из целлюлозы, представленные в виде фибриллизованного волокна или гранул. Добавки в виде волокон должны быть однородными и содержать не менее 50 % фибр длиной 0,5 – 1,9 мм. Волокна спрессованы непосредственно в сами гранулы и могут быть обработаны различными составами, либо без спрессовывания и обработки. Волокнистые стабилизирующие добавки должны отвечать требованиям ГОСТ 31015-2002.

Возможность использования добавок из других волокон и материалов (акриловых, стеклянных, минеральных, различных полимеров, резинового порошка и пр.) необходимо обосновывать испытаниями смесей ЦМА.

Одними из самых широко используемых и качественных стабилизирующих добавок на сегодняшний день являются добавки типа Viator, Technocel, Torcel, Genicel поставляемые из-за рубежа, которые состоят из целлюлозных волокон, спрессованных в гранулы. Добавкой из чистых волокон является Torcel, в виде целлюлозных гранул – Technocel. Добавки семейства Viator (Viator-66, Viator premium, Viator superior) состоят из целлюлозного волокна, пропитанного битумом, и представляют собой гранулы с битумной оболочкой, которая создана для борьбы с комкованием, а также обеспечивает хорошую сыпучесть гранул. Соотношение битума в добавках Viator может быть различным (10 – 34 %).

(например, Viator-66 на 66,6 % состоит из целлюлозных волокон «Abrocel ZZ 8-1» и на 33,3 % из битума).

Использование стабилизирующих добавок снижает сегрегацию и положительно влияет на некоторые свойства ЩМА. Например, добавка Genicel, за счет содержания алифатических углеводов, существенно повышает температуру размягчения битума по испытанию «кольцо и шар» и снижает его пенетрацию, улучшает адгезию битума, повышает устойчивость к образованию колеи [171].

Недостатком импортных стабилизаторов является их высокая стоимость. При использовании добавки Viator, в состав которой входят целлюлозные волокна, обработанные битумом, для предотвращения стекания вяжущего необходимо добавлять на 50 % больше материала по сравнению с чистым целлюлозным гранулятом Torcel. Так, ЩМА с применением добавки Torcel дороже традиционных асфальтобетонов на 15-20 %, а с Viator-66 – на 30 % [171]. Однако, стоит отметить, что отечественные стабилизирующие добавки типа Хризотоп, СД-3 ГБЦ, СД Армидон, Стилорит также имеют высокую стоимость.

Кроме целлюлозных волокон находят применение и добавки из акриловых волокон, такие как Dolanit.

Отечественными учеными предложено в качестве альтернативы древесной целлюлозе использовать целлюлозу из лубяных культур, а именно – льна [97, 98].

Предложено производство щебеночно-мастичных асфальтобетонов без использования добавок в виде целлюлозных волокон, фибры или гранул [109]. В таких ЩМАС используется специально разработанное вяжущее БИТРЭК.

В работе [143] предложено производить ЩМА на основе техногенного сырья. В качестве стабилизирующих добавок применяют волокнистые отходы промышленности, при этом удешевляется производство, и повышаются некоторые физико-механические свойства асфальтобетона.

Некоторые зарубежные фирмы предлагают применять в качестве добавок отходы производства – капроновые, полиэтиленовые, полипропиленовые волокна

[144]. При их использовании наблюдается улучшение технологических и физико-механических качеств асфальтобетонов.

В Германии при строительстве отдельных участков дорог использовали ЩМА, модифицированные отходами текстильного производства с общей долей отходов в смеси до 2 % [145]. Отмечалось повышение упругости, уменьшение деформативности, высокая устойчивость к влиянию низких температур. Однако наблюдалось и увеличение влагоемкости.

В США при укладке асфальтобетона и при ремонте дорог в ЩМАС использовалось вяжущее с добавлением синтетических волокон длиной около 9-10 мм [146], что положительно повлияло на трещиностойкость. В случае применения синтетических волокон необходим жесткий контроль температурного режима. При низкой температуре приготовления волокна не растягиваются и плохо перемешиваются, а при слишком высокой – распадаются.

Ученые считают, что перспективным могло бы быть производство ЩМА не со стабилизирующей добавкой, а с комплексной структурирующей добавкой. Данная добавка должна содержать как полимерный модификатор, так и стабилизирующий и одновременно армирующий компонент [105]. Таким образом, происходит и повышение качества вяжущего и стабилизация смесей, что может упростить технологию и стоимость ЩМА.

Одной из таких добавок может служить стабилизатор РТЭП, представляющий собой многокомпонентную композицию на основе полиолефинового полимерного носителя, содержащего дорожный битум, термоэластопласты, резиновую крошку, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и антиоксиданты [106-108, 141, 147]. По сравнению с обычным асфальтобетоном смесь, содержащая РТЭП, менее подвержена пластическим деформациям, образованию колеи и разрушениям. Однако, недостатком указанной ЩМАС с добавкой РТЭП является недостаточная устойчивость к расслаиванию в процессе транспортирования и загрузки-выгрузки, определяемая по показателю стекания вяжущего в соответствии с ГОСТ 31015-2002. Однородность смеси, оцениваемая по коэффициенту вариации показателя предела прочности при сжатии при

температуре 50°C и по значениям средней плотности, становится низкой, что снижает длительную водостойкость и долговечность покрытия из ЩМА.

Большая часть предлагаемых стабилизирующих добавок для ЩМА изготавливается из целлюлозных волокон, различных резиновых модификаторов и отходов промышленности [98-103]. Общим недостатком большинства используемых добавок является повышенная стоимость.

При производстве щебеночно-мастичных смесей в России применяются все стабилизирующие добавки, предлагаемые на отечественном рынке [78-80, 89, 97-107]. Большинство ЩМАС выпущено с применением добавки Viator-66.

1.4 Опыт использования пористых материалов в составах асфальтобетонов и битумоминеральных композиций

Одним из перспективных направлений повышения качества и долговечности асфальтобетонов, и в том числе, щебеночно-мастичных асфальтобетонов, по нашему мнению, является возможность применения в их составах пористых минеральных материалов.

Еще с середины 40-х и до конца 60-х годов прошлого века многими исследователями велись работы по применению малопрочных известняков в качестве заполнителей в асфальтобетонах [12, 109-111]. Малопрочные известняки, как известно, обладают достаточно высокой пористостью и, как следствие, повышенной битумоемкостью. Тем не менее, составы с использованием малопрочных известняков марок 400 – 600 характеризуются высокими физико-механическими и эксплуатационными показателями (прочностью и теплостойкостью), но обладают низкой водостойкостью.

На сегодняшний день металлургическая промышленность в процессе выпуска основного сырья также производит большое количество отходов производства, таких как пористые шлаки, пемза, шлам мокрой газоочистки доменного и конверторного производства, отходы производства шлаковаты, агломерационная пыль, которые находят применение в составах асфальтобетона в качестве заполнителей и наполнителей. Разработкой составов асфальтобетонов с

применением отходов металлургической промышленности занимались Королев И.В., Гезенцев Л.Б., Беликов А.С., Ахмедов Ш.А., Володько В.П., Поличковская Т.В. и др. [112].

Самодуров С.И., Расстегаева Г.А. и др. исследовали асфальтобетоны, в составе которых в качестве заполнителя и минерального порошка использовались отходы металлургической промышленности (шлак ОЭМК, шлам мокрой газоочистки доменного производства и конверторного производства НЛМК, корольки и обрезки шлаковаты и т. п.) [113-119].

Щербина П.С. и Пачернин А.С. разработали составы мелкозернистого и песчаного асфальтобетонов с использованием шлакопемзового песка и молотой пемзы [120].

Золотарев В.А., Братчун В.И. и др. изучали особенности формирования структуры дегтешлакобетонов [121].

В работах [10, 120] представлены результаты использования в строительстве дорог зол и шлаков ТЭС. Волженский А.В., Иванов И.А и др. показали возможность применения золы-уноса тепловых электростанций:

- в качестве активной минеральной добавки при укреплении каменных материалов и грунтов известью или цементом;
- отдельного и полноценного вяжущего для укрепления местных материалов и грунтов;
- в роли минерального порошка в составах асфальтобетонов.

Перспективным направлением в развитии дорожного строительства является использование в составах асфальтобетонов и битумоминеральных композиций легких пористых заполнителей и наполнителей. В настоящее время существует опыт применения таких материалов и составов на их основе в конструкциях дорожных одежд.

В своих работах Сухоруков Ю.М., Белоусов В.М. предлагают для уменьшения толщины конструктивных слоев дорожной одежды использовать искусственные и естественные теплоизоляционные материалы с присутствием цемента в малых дозах [122, 123]. В подстилающем слое дорожной конструкции

возможно применение таких пористых материалов как аглопорит, керамзит, шлаковая пемза и др. без использования вяжущего; в основаниях дорожных одежд – обработанные минеральными вяжущими, а непосредственно в покрытии – обработанные органическими вяжущими. При этом авторы указывают на положительный опыт применения вышеописанных слоев в дорожных конструкциях.

В работе Салминена Э.О. [123] показан положительный опыт внедрения керамзита в дорожном строительстве Финляндии. Имеется опыт применения аглопорита в качестве материала для конструктивных слоев покрытия [124].

В мировой строительной практике используется перлит и битумоперлитовые композиции. В ряде работ [125-132] изложен характер изменения физико-механических свойств и релаксационной способности асфальтобетона в зависимости от объема пористого минерального порошка (из перлита) и битума в смеси. Но включение перлитовой пыли влечет за собой повышение битумоемкости.

Во Франции проведены исследования асфальтобетонных смесей с применением обожженных вспученных сланцев размером 6-10 мм [133]. В ходе наблюдений было выявлено, что данный пористый материал в теплое время года поднимается к поверхности и тем самым при износе повышает шероховатость покрытия.

В работе [134] предложено использовать в составе асфальтобетонов дорсил (дорожный ситал), искусственный пористый материал. Данный материал обеспечивает повышенную шероховатость и яркость покрытия.

Ярцев В.П., Грушо-Новицкая А.О. с целью повышения физико-механических и эксплуатационных показателей битумной мастики предложили включать в состав смеси, в качестве наполнителя, керамзитовую пыль, образующуюся в ходе производства керамзита [135]. Керамзитовую пыль добавляли в нагретый до температуры плавления битум в объеме 20, 30, и 50 масс. частей. В процессе испытаний было выявлено, что наиболее эффективное влияние на прочность и жесткость битума оказывают малодисперсные отходы

керамзита. Наиболее оптимальный эффект получен при использовании 20 масс. частей керамзитовой пыли фракции менее 0,315 мм.

В работе [10] в состав битумоминеральных композиций включали отходы производства керамзита (керамзитовую пыль). При этом был подобран рациональный состав асфальтобетона типа Г, в результате чего наблюдалось повышение прочностных качеств, трещиностойкости и водостойкости.

Аминов Ш.Х., Струговец Г.Г показали возможность использования в асфальтобетонной смеси пиритных огарков в качестве наполнителя [136]. Данные отходы полностью соответствуют по своим свойствам стандартным требованиям для минеральных порошков. Применение пиритных огарков дает возможность получать активированные минеральные порошки, отвечающие соответствующим требованиям. Ко всему прочему наблюдается повышение прочности и водостойкости асфальтобетонов и щебеночно-мастичных асфальтобетонов на их основе.

Борисенко Ю.Г., Солдатовым А.А. и др. [137, 138] исследована возможность применения высокодисперсных отходов дробления керамзита в качестве минерального порошка для легких и плотных битумоминеральных композиций. Отмечено, что применение данного материала способствует значительному увеличению прочности, трещиностойкости, теплостойкости и сдвигоустойчивости асфальтобетонов на их его основе.

В работах [139, 140] представлено теоретическое обоснование эффективности применения высокопористых материалов (в том числе, керамзитового песка) в качестве заполнителей легких горячих асфальтобетонов.

Высоцкой М.А., Кузнецовым Д.К [150, 151] рассмотрены особенности структурообразования битумоминеральных композиций с применением пористых наполнителей (перлита, керамзита, цеолита). Выявлено определяющее влияние пористости минеральных порошков на их структурирующую способность относительно битума и доказана эффективность использования пористых минеральных порошков с высоким содержанием кислотных центров для создания плотных структур асфальтобетонов.

Салиховым М.Г., Вайнштейном В.М., Вайнштейном Е.В предложен способ получения щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси с добавкой отсеков дробления известняков [103]. При этом наблюдается повышение прочностных показателей, водостойкости и снижение водонасыщения.

1.5 Выводы, цели и задачи исследования

Проведенный обзор отечественной и зарубежной научной и патентной литературы в области применения пористых минеральных материалов в строительстве позволил выявить следующее. Применение пористых материалов для приготовления асфальтобетонных смесей (в качестве заполнителей и наполнителей) является одним из перспективных направлений для получения дорожных покрытий с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Применение пористых материалов способствует улучшению прочностных характеристик, повышению сдвигоустойчивости, трещиностойкости, водостойкости. Повышение этих свойств обусловливается особенностями взаимодействия пористых материалов с органическим вяжущим. Кроме того, одной из особенностей взаимодействия пористых материалов является избирательная фильтрация компонентов битумного вяжущего в поры материала. По нашему мнению, применение высокодисперсных пористых порошковых материалов в щебеночно-мастичных асфальтобетонах будет способствовать повышению качества материала, снижению сегрегации смеси (за счет процесса избирательной фильтрации) и снижению себестоимости производства материала.

На основании проведенного критического анализа литературных и патентных источников сформулированы цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование возможности получения, разработка составов и технологии производства щебеночно-мастичных асфальтобетонов, модифицированных пористыми порошковыми материалами (керамзитовым

порошком), с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- на основании критического анализа зарубежной и отечественной научной, патентной и технической литературы обосновать целесообразность применения пористых порошковых материалов в составах щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей для обеспечения повышения качества ЩМА и снижения сегрегации смеси;
- выявить особенности топографии, микроструктуры и дисперсности исследуемых пористых порошков;
- установить влияние различных пористых порошков на структурообразование асфальтовяжущих щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и на свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов и обосновать выбор керамзитового порошка, как наиболее эффективного модификатора ЩМА;
- на основании экспериментальных исследований выявить закономерности влияния содержания керамзитового порошка в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях на физико-механические, структурно-механические и эксплуатационные свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов;
- разработать рациональные составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком;
- разработать оптимальную технологию приготовления высококачественных щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком;
- провести опытное внедрение разработанных щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и оценить технико-экономическую эффективность ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

2.1 Особенности взаимодействия битума с пористыми материалами

При изучении структуры асфальтобетонов, битумоминеральных композиций с применением пористых порошковых материалов необходимо учитывать физические, физико-химические и химические особенности взаимодействия пористого минерального материала с вяжущим веществом, которые являются одними из определяющих факторов структурообразования композиций на органическом связующем.

2.1.1 Движение жидкости в пористых телах

В большинстве случаев приготовление и укладку горячих асфальтобетонных смесей производят при достаточно высоких температурах (140-160 °C). В этих условиях битум переходит в жидкое агрегатное состояние, то есть имеет свойства ньютоновской жидкости. Для описания взаимодействия битума с пористыми телами в таких условиях наиболее подходящим является закон Стокса, описывающий движение вязкой жидкости в цилиндрическом капилляре [152].

Если предположить, что течение жидкости по цилиндрическому капилляру радиусом r и длиной l ламинарное, при котором каждый слой жидкости течет с определенной скоростью, возрастающей от нуля до $u_{\text{макс}}$, то согласно закону Ньютона, сила внутреннего трения, на цилиндрической границе движения радиусом x , будет равна [152]

$$F_{\text{тр}} = - \eta s \, du / dx = - \eta 2\pi x l \, du / dx, \quad (2.1)$$

где s – площадь цилиндра из жидкости, x – радиус цилиндра, l – длина цилиндра; du / dx – градиент скорости движения жидкости по направлению с поверхности к оси цилиндра.

На механизм движения жидкости в капиллярах влияют такие факторы, как перепады давления, электрическая сила, сила тяжести. Так как нами рассматривается движение жидкости в капилляре, то данные силы будут оказывать практически одинаковое влияние на характер движения. В таком случае, наиболее оптимальным, является изучение движения жидкости, возникающего под действием перепадов давления Δp . Значение возникающей силы будет равно[152]

$$F_p = \Delta p \pi x^2. \quad (2.2)$$

При ламинарном и равномерном движении сила трения будет равна силе действующей при перепаде давления.

Если представить, что скорость движения жидкости непосредственно около стенки цилиндра равна нулю ($u = 0$, где $x = r$), то максимальную скорость в центре капилляра можно представить, как

$$u_{\text{макс}} = \Delta p r^2 / (4\eta l). \quad (2.3)$$

Однако, для более точного понимания и описания данного процесса необходимо учитывать гидродинамические характеристики пористых тел. Важнейшим гидродинамическим свойством пористых тел является их проницаемость. Для оценки проницаемости потока жидкости или газа через пористое тело пользуются законом Дарси

$$i_v = k \Delta p / (\eta l), \quad (2.4)$$

где $i_v = V/(s \tau)$ – объемный поток жидкости или газа, т.е. объем (V) жидкости или газа, проходящий через единицу поверхности (s) тела в единицу времени (τ); η – вязкость вещества; k – коэффициент проницаемости [152].

Одним из распространенных процессов переноса массы жидкости в пористые тела является капиллярная пропитка, возникающая под действием капиллярных сил и, отчасти, гидростатического давления. Капиллярная пропитка представляет собой процесс поднятия жидкости по капиллярам пористых тел под действием капиллярного давления p_k , направленного против гидростатического давления p_r . Разность давления в открытых капиллярах будет представлять следующее [152]

$$\Delta p = p_{\kappa} - p_{\Gamma} = 2\sigma (\cos \theta) / r - \rho g l \sin \alpha , \quad (2.5)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; θ – краевой угол смачивания; l – длина заполненного жидкостью участка капилляра в данный момент; α – угол наклона капилляра.

При взаимодействии вязущего с пористыми телами также происходит процесс диффузии, сопровождающийся набуханием. Набухание также является одним из процессов переноса жидкости внутрь твердого тела. Отличие набухания от капиллярной пропитки состоит в том, что набухание – процесс диффузионный, его движущая сила – градиент химического потенциала жидкости (или осмотическое давление) и сопровождается оно увеличением объема и массы твердого тела. Набухание сопровождает не только диффузию жидкости в пористые тела, но и сольватацию макромолекул.

Существует большое разнообразие процессов переноса компонентов растворов в капиллярах пор, которые обуславливаются условиями переноса, движущей силой, а также спецификой компонентов и размерами и конфигурацией пор.

Диффузионный режим переноса вещества зависит от разности химических потенциалов и разности его концентрации. Диффузия бывает объемная, кнудсеновская, или молекулярная, активированная и поверхностная [152-154].

Согласно закону Фика [152-154] объемная диффузия протекает вдоль капилляра при условии сплошности среды и наличии разности концентраций растворов:

$$i_{\text{диф}} = - D \Delta c / l , \quad (2.6)$$

где D - коэффициент диффузии; Δc - разность концентраций вдоль капилляра на расстоянии l .

Диффузионный поток пористого тела, приходящийся на единицу площади сечения тела при известном общем сечении капилляров (пористость Π) и коэффициенте извилистости δ для капилляров будет равен:

$$i_{\Sigma \text{ диф}} = - (D \Pi \Delta c) / (\delta l) . \quad (2.7)$$

Если в макропорах в основном происходят процессы объемной диффузии, то для микропор характерна активированная диффузия. Микропоры характеризуются повышенной адсорбционной способностью и сорбируют большую часть активных компонентов битума. Микропоры впитывают молекулы, которые сопоставимы с размерами пор. Однако данный процесс происходит при условии, что молекулы впитываемого вещества обладают высокой энергией активации.

Большое влияние на механизм переноса вещества через капиллярно-пористое тело оказывает поверхностная диффузия. Как правило, поверхностная диффузия является следствием переноса компонентов жидкости в процессе движения молекул на границе раздела фаз и направлена от больших концентраций вещества к меньшим [152].

Процесс переноса вещества в большинстве случаев выражается обобщенным уравнением. Это связано с тем, что фактически во всех пористых телах присутствует множество капилляров неправильной формы, что затрудняет описание данного процесса всего лишь одной моделью. Механизм переноса вещества в поры материала можно описать следующим выражением[157]:

$$i = - D_{\text{экв}} \, dc / dx , \quad (2.8)$$

где $D_{\text{экв}}$ - эквивалентный (эффективный) коэффициент диффузии, учитывающий разнообразие механизмов переноса в данной системе; dc / dx – градиент давления.

Эффективный коэффициент диффузии, в сравнении с описанными выше, во многом определяется свойствами пористой структуры тела [152].

Исходя из вышеизложенного, следует, что законы течения жидкости в пористых телах в отношении к асфальтобетонам и битумо-минеральным композициям, модифицированными пористыми минеральными материалами, играют важную роль в понимании процесса их структурообразования, прогнозирования и регулирования их свойств и имеют высокую практическую значимость при проектировании составов асфальтобетонных смесей с заданными физико-механическими и эксплуатационными показателями.

2.1.2 Адсорбционные процессы

Адгезия между наполнителем и матрицей является основным условием для получения композиционного материала, в том числе и битумоминерального [152]. Большое значение на формирование структуры и свойств композиционных материалов оказывают поверхностные явления, происходящие на границе контакта пористого материала (субстрата) и органического вяжущего (адгезива), а также величина адгезии пористым материалом связующего. При этом, понимание механики взаимодействия различных составляющих композита позволяет выявить пути направленного регулирования свойств и их оптимизации применительно к техническим требованиям и условиям использования данного материала в изделии, конструкции и т.д.

Величина адгезии между двумя телами обуславливается действующими межмолекулярными силами. Повышение величины сил взаимодействия между молекулами вяжущего вещества и минерального материала приводит к повышению прочностных свойств получаемого материала. В композиционных материалах на органическом связующем адгезия происходит преимущественно под влиянием физических и физико-химических сил взаимодействия (ван-дер-ваальсовых сил). В битумоминеральных композициях, включающих пористые минеральные материалы, на величину адгезии вяжущего минеральными материалами решающее значение могут оказывать следующие факторы:

– **морфология твердой поверхности.** Известно, что чем больше площадь взаимодействия между адгезивом и субстратом, тем выше величина адгезии в не зависимости от действующих сил между фазами. Если адгезив представляет собой раствор, жидкость или эмульсию, то на величину площади фактического контакта влияют такие факторы, как смачивание, способность адгезива заполнять неровности твердой поверхности, вытесняя при этом воздух. Качество контакта, а, следовательно, и адгезия между взаимодействующими поверхностями зависит от морфологии поверхности субстрата, его микрорельефа, топографии и чистоты [155];

– **особенности формирования контакта.** Бóльшая полнота контакта адгезива с субстратом ведет к повышению количества взаимодействующих функциональных групп. Учитывая, что поверхность пористых тел испещрена множеством пор, трещин и бороздок, то вследствие их заполнения адгезивом фактическая площадь контакта значительно увеличивается. Такие углубления можно приравнять к капиллярам и тогда для оценки глубины затекания в них адгезива можно применить известные уравнения капиллярного поднятия [155, 156]. Для жидкости плотностью ρ , имеющей поверхностное натяжение σ и угол смачивания данной поверхности φ , высота поднятия h в капилляре диаметром d определяется уравнением:

$$h = (4\sigma \cos\varphi) / (\rho dg), \quad (2.9)$$

где g – ускорение свободного падения.

Высота поднятия жидкости между двумя параллельными пластинками с зазором a определяется по формуле [160]:

$$h = (2\sigma \cos\varphi) / (\rho ag). \quad (2.10)$$

Согласно приведенным зависимостям следует, что высота капиллярного поднятия прямо пропорциональна поверхностному натяжению жидкости и $\cos\varphi$, т.е. зависит от термодинамических факторов. С другой стороны, чем меньше диаметр капилляра или зазор, тем выше капиллярное поднятие. Поднятие жидкости происходит до тех пор, пока капиллярное давление не уравнивается гидростатическим давлением столба поднявшейся жидкости [155];

– **диффузионные процессы на границе раздела.** Диффузия между адгезивом и субстратом во многих случаях не ограничивается адсорбцией полимерных молекул на твердой поверхности или микрореологическими процессами в вязкотекучем и вязкоупругом адгезивах. В процессе диффузии система может претерпевать дальнейшие, более глубокие изменения, приводящие в предельном случае к исчезновению границы раздела фаз [155].

Процесс диффузии между адгезивом и субстратом происходит не всегда, однако при взаимодействии пористых субстратов такое явление является достаточно характерным и в этом случае необходимо учитывать влияние

диффузии, так как одностороннее или взаимное проникновение фаз обеспечивает более полный молекулярный контакт и, следовательно, бóльшую прочность связи.

Согласно [155] необходимо принимать во внимание не только диффузию макромолекул, но и диффузию через границу раздела различных низкомолекулярных веществ, а именно различных ингредиентов, входящих в состав адгезива и субстрата, примесей, не прореагировавших мономеров и т.п.

Результатом диффузии этих веществ могут быть изменения прочностных свойств адгезива и субстрата, что оказывает непосредственное влияние на величину адгезионной прочности.

Принято считать, что движущей силой диффузии является градиент концентрации [155]. Однако перемещение, вызываемое градиентом концентрации, приводящее к постепенной гомогенизации системы, не исчерпывает все возможные проявления этого сложного процесса. Зачастую при диффузии происходит не выравнивание концентраций, а обратный эффект, характеризующийся дальнейшим разделением компонентов системы (избирательная фильтрация). Учитывая это можно полагать, что движущей силой диффузии скорее будет разность термодинамических потенциалов. Равновесие термодинамических потенциалов достигается вследствие движения атомов (молекул) [155].

На диффузию (а также на коэффициент диффузии) макромолекул значительное действие оказывает молекулярный вес диффундирующего вещества (пенетранта) [157]. Чем выше молекулярный вес полимера, тем больше препятствий для диффузии.

Таким образом, повышение адгезии между минеральной частью и органическим связующим органоминерального композиционного материала возможно:

- при увеличении площади фактического контакта между адгезивом и субстратом (например, применяя минеральные материалы с повышенной удельной поверхностью);

– при бóльшей полноте контакта адгезива с субстратом, что обеспечит взаимодействие большего числа функциональных групп. Так, площадь контакта увеличивается при заполнении адгезивом пор, трещин и бороздок субстрата;

– учитывая, что в случае применения пористых субстратов диффузионные явления между адгезивом и субстратом являются характерными, то необходимо учитывать влияние диффузии, поскольку одностороннее или взаимное проникновение фаз обеспечивает более полный молекулярный контакт и, следовательно, бóльшую прочность связи в структуре получаемого композита.

2.1.3 Избирательная фильтрация

Взаимодействие битума с пористыми материалами характеризуется рядом особенностей, обусловленных, с одной стороны, характером поверхности и структурой адсорбента (размером и расположением пор), а с другой – особенностями битума (активностью и групповым составом) [9, 12]. При переходе битума в пленочное состояние происходит самопроизвольное уплотнение его под влиянием внутримолекулярного сцепления и поверхностных сил притяжения [158]. При этом происходит синерезис битума с изменением фазового состава: из геля выделяется жидкая среда – масла, легкие смолы в виде раствора с очень малой концентрацией асфальтенов [3]. В результате, при применении пористых минеральных материалов, наблюдается избирательный фильтрационный эффект проникания составных частей битума в поры минеральных частиц (избирательная фильтрация). Глубже в поры проникают масла, ближе к поверхности смолы и на поверхности адсорбируются в основном асфальтены [46]. Сорбция и фильтрация происходят одновременно, следовательно, образование обволакивающих пленок, играющих роль структурных связей системы, происходит при участии обоих процессов [158].

При исследовании структурообразования асфальтобетонов на низкопрочных ракушечных известняках С.М. Атояном было выявлено, что при смешивании с битумом крупнозернистых минеральных материалов, обладающих очень развитой внутренней поверхностью, сорбционные процессы оказывают

значительное влияние в виде изменения структуры обволакивающей пленки битума вследствие избирательной диффузии его составных частей [158]. В результате битум в системе асфальтобетона находится в различных качественных формах, обусловленных физико-химическими сорбционными процессами, возникающими при взаимодействии между битумом и минеральным материалом. Согласно [158] при объединении битума с известняковым минеральным порошком наиболее подвижная часть битума с разрушенной в результате синерезиса структурой располагается на внутренней поверхности частиц (в микропорах) и удерживается капиллярными силами поверхностного натяжения. Для диффузии битума в микропоры диаметр их должен быть не менее 0,05 мк, что соответствует размеру самых мелких пор в известняках. В крупные поры битум проникает без фракционирования, но затем этот процесс продолжается, так как известняки обладают системой сообщающихся пор разной величины. В результате миграции наименее вязких составляющих битума на внешней поверхности адсорбента образуется мономолекулярная, упрочненная сольватная оболочка, состоящая из концентрированного раствора асфальтенов, асфальтогеновых кислот и их ангидридов.

При соприкосновении смежных оболочек создаются пространственные структурные связи, служащие основой процесса структурирования битума. Вследствие значительной напряженности силового поля реагирующей поверхности минеральных частиц между зонами контакта сольватированных оболочек мицеллы битума также плотно фиксируются, причем толщина этих слоев может во много раз превосходить толщину мономолекулярного хемосорбционного слоя. С постепенным убыванием концентрации молекулярных адсорбционных сил структурированные оболочки постепенно переходят в слои объемного битума с ненарушенной структурой, т.е. вязкость и плотность битума постепенно убывают, выравниваясь со свойствами исходного битума [158].

В результате взаимодействия битума с частицами известняка, а особенно с частицами известнякового минерального порошка, согласно исследованиям автора [158], создается упругая система, с мало изменяющимися свойствами в

широком диапазоне температур, в основном определяющая структурно-механические свойства асфальтобетона в начальный период его службы в покрытии.

Шероховатость и пористость повышают сорбционную емкость порошков [159, 160], так как взаимодействие битума с минеральным порошком обусловлено главным образом очень развитой внутренней поверхностью зерен наряду с развитой поверхностью самих зерен. Пористые активные порошки обладают более высоким структурирующим воздействием, чем инактивные плотные [43]. Наиболее благоприятным условием для протекания хемосорбционных процессов является наличие на поверхности минеральных частиц ребер, пиков, острых граней, а для физической адсорбции – «ям», углублений, микротрещин [160].

Очевидно, что основные особенности процесса структурообразования битумо-минеральных композиций на основе искусственных легких пористых наполнителей будут аналогичны особенностям структурообразования асфальтобетонов на основе низкопрочных известняков, изложенным выше.

Искусственные пористые наполнители являются высокопористыми материалами, обладающими высокой открытой и закрытой пористостью. Наличие большого количества пор обуславливает очень высокую удельную поверхность таких материалов.

Таким образом, пористые минеральные тела (например, низкопрочные известняки, высокодисперсные отсеvy дробления керамзита, перлита) будут обладать высокой сорбирующей способностью. Этот эффект можно использовать в ЩМА, например для снижения сегрегации (стекания) вяжущего.

Согласно физико-химическим представлениям о физической адсорбции в пористых композициях, поры, в зависимости от размера, выполняют следующие функции: микропоры – адсорбционную; промежуточные поры (мезопоры) – адсорбционную (на внутренней поверхности пор сорбируется поглощаемый компонент) и транспортную (перенос молекул поглощаемого компонента к микропорам, где сорбируется его основное количество); макропоры – транспортную (перенос поглощаемого компонента к микро- и мезопорам) [165].

Пористые минеральные материалы, такие, например, как керамзитовый гравий или песок (особенно дробленый) можно отнести к смешанным сорбентам, так как зерна керамзита имеют в наличии поры различных размеров – от микропор до макропор. Микропоры отличаются высоким адсорбционным потенциалом, благодаря чему в них сорбируется значительная часть поверхностно-активных компонентов битума. Сорбционные процессы, происходящие при взаимодействии пористых адсорбентов с битумом, могут быть охарактеризованы следующим образом: асфальтены адсорбируются на поверхности минеральных частиц, смолы сорбируются в мелких порах, находящихся на поверхности частиц [9, 12]. В.М. Смирновым установлено [46], что наименее поверхностно-активный и наименее вязкий компонент битума – масла, могут проникать по капиллярам внутрь материала.

Анализ исследований структуры битумов показал [55], что одним из составляющих элементов битумного вяжущего – асфальтенам – присуща слабовыраженная кристалличность. Эти образования окружены химически инертной масляной оболочкой, препятствующей эффективному проявлению энергетической способности химически активных функциональных групп, входящих в состав смолисто-асфальтеновых комплексов [132]. Так как функция масел в составе битумов заключается в снижении старения вяжущего, то с повышением содержания масел процесс полимеризации битумов «замораживается» [65-72, 161-166, 167]. В асфальтенах, помимо реакционных функциональных групп, имеются также и стабильные радикалы, которые могут активно вступать в реакции при отсутствии масляной оболочки [56, 108]. Таким образом, возможно, что реакционная способность наиболее химически активных компонентов битума блокирована инертной масляной оболочкой [132]. Существует мнение, что наличие высокого количества масел снижает адгезионную способность битума при взаимодействии с минеральными материалами, используется лишь часть реакционно-химического потенциала асфальтогеновых кислот и их ангидридов. Повышение энергии активации применительно к пористым материалам достигается увеличением дисперсности и

физико-химической активности. Один из возможных способов повышения энергии Гиббса – механоактивация (измельчение).

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить следующие особенности взаимодействия пористых материалов (в том числе порошковых) с битумным связующим. В ходе диффузии битума в микропоры проникают наименее активные и наиболее легкие по молекулярному весу компоненты, соизмеримые с размерами пор – масла, ароматические углеводороды. Результатом избирательной фильтрации является обогащение битума наиболее вязкими и активными компонентами – асфальтенами и смолами, что ведет к повышению адгезии и вязкости битума. На величину адгезии также большое влияние оказывают особенности поверхности применяемого пористого наполнителя, обладающего высокой удельной поверхностью, дисперсностью, сложной топографией. Вышеуказанные особенности пористых наполнителей могут быть эффективно использованы в щебеночно-мастичных асфальтобетонах, например для снижения стекания битума, повышения физико-механических и эксплуатационных свойств ЩМА.

2.2 Пути повышения прочности и сдвигоустойчивости ЩМА

Свойства асфальтобетона, как дорожно-строительного материала на основе органических вяжущих (битумов), во многом зависят от температуры. Наиболее зависимы от температурного режима деформативные свойства асфальтобетона, такие как сдвигоустойчивость, пластичность, трещиностойкость. Данные свойства во многом зависят от поведения вяжущего в различных условиях.

С увеличением температуры битум становится менее вязким, что влечет за собой снижение сдвигоустойчивости и прочности асфальтобетонного покрытия вследствие ухудшения адгезии битумного вяжущего к поверхности минерального материала [12].

Для эффективной работы асфальтобетона при различных эксплуатационных температурах необходимо выполнение следующих условий: достаточная деформационная устойчивость при высоких летних температурах (т.е.

теплоустойчивость) и достаточная деформативная способность при низких температурах (т.е. высокая трещиностойкость) [12].

При высоких летних температурах неизбежно появление различных деформаций дорожного покрытия: наплывов, волн, колеиности и т. д. На сегодняшний день под воздействием возросших транспортных нагрузок в асфальтобетоне возникают высокие горизонтальные (сдвигающие) усилия, достигающие до величины вертикальных и равные 0,6-0,8 МПа (по некоторым современным данным и более 1-1,3 МПа). Это вызывает увеличение сдвиговых напряжений в покрытии и появление различных деформаций [12].

Как известно, сдвигоустойчивость асфальтобетонных покрытий тесно связана с его прочностью. Повышенной прочности при высоких температурах соответствуют высокие показатели сдвигоустойчивости дорожных покрытий.

Согласно теории Мора, предельные сопротивления одноосному сжатию материала связаны со сцеплением его частиц между собой и внутренним трением, возникающим между ними:

$$\text{сопротивление сжатию: } R_c = 2c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right); \quad (2.11)$$

$$\text{сопротивление растяжению: } R_p = \frac{2c}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (2.12)$$

где c – сцепление, МПа; φ – угол внутреннего трения.

Таким образом, высокое сцепление сопутствует высокому сопротивлению на растяжение и сжатие материала.

Соотношение же сопротивления сжатию к сопротивлению растяжения зависит только от угла внутреннего трения [83]:

$$\frac{R_c}{R_p} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \quad (2.13)$$

Угол внутреннего трения φ и сцепление c можно выразить следующими зависимостями [81]:

$$\sin\varphi = \frac{(R_c - R_p)}{(R_c + R_p)}, \quad (2.14)$$

$$c = 0,5\sqrt{R_c \cdot R_p}. \quad (2.15)$$

Таким образом, чем выше угол внутреннего трения φ и сцепление c , тем выше прочность материала.

Устойчивость к образованию пластических деформаций будет достигнута, если прочность асфальтобетона будет удовлетворять следующему условию [81]

$$R_{расч} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot h \cdot \lambda}{D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (2.16)$$

где σ – расчетное напряжение, действующее на покрытие, МПа; h – толщина слоя асфальтобетона, м; λ – коэффициент, учитывающий совместное действие вертикальных и горизонтальных напряжений; D – ширина следа колеса, м; φ – угол внутреннего трения асфальтобетона.

Сопротивление асфальтобетона сдвигу, согласно теории Н.Н. Иванова [77, 168], основывающейся на известном уравнении Кулона, выражается зависимостью:

$$\tau = P \cdot \operatorname{tg}\varphi + C + \Sigma, \quad (2.17)$$

где P – нормальное давление на площадке сдвига, МПа; φ – угол внутреннего трения материала; C – зацепление минеральных зерен, МПа; Σ – сцепление, обусловленное битумными связями, МПа.

Первые два слагаемых $(P \cdot \operatorname{tg}\varphi + C)$ выражают сопротивление сдвигу, обусловленное особенностями структуры минерального остова асфальтобетона. Согласно Горелышеву Н.В., Баловневой И.И. одним из основных направлений повышения сдвигоустойчивости может быть увеличение количества щебня в композиции [169, 170]. Однако, Гезенцевей Л.Б. и др. [3] указывают, что в ряде случаев такие асфальтобетонные покрытия подвержены коррозионному разрушению.

Известно, что большое влияние на показатель внутреннего трения и сцепления внутри асфальтобетонной композиции оказывает форма и поверхность

минерального заполнителя. Применение в составах асфальтобетонных смесей щебня остроугольной формы, щебня с гексагональной формой зерен, песка из отсеков дробления способно существенно повысить угол внутреннего трения и сцепление, тем самым повышается сдвигоустойчивость и прочность [12]. По мнению Рыбьева И.А., Гезенцева Л.Б., Королева И.В. и др. [6, 8, 23] повышение сдвигоустойчивости асфальтобетона возможно за счет улучшения свойств асфальтовяжущего и взаимодействия его компонентов (битум – минеральный порошок). Известно, что включение пористых порошковых материалов (например, высокодисперсных отсеков дробления керамзита) в асфальтобетоны и битумоминеральные композиции позволяет повысить их прочность и сдвигоустойчивость [149].

Интенсификацией процесса структурообразования битумоминеральных композиций, как показано в работах [15], также является предварительная физико-химическая активация используемых материалов.

На сцепление асфальтобетонов с применением плотных минеральных заполнителей основное влияние оказывает вязкость битума, соотношение битум – минеральный порошок и характер взаимодействия битума с минеральным материалом. Согласно многочисленным исследованиям асфальтобетоны на природных окатанных минеральных материалах (крупный заполнитель, песок) имеют низкие показатели сдвигоустойчивости. Это объясняется их невысокой удельной поверхностью и сглаженной формой частиц. Следовательно, на внутренне трение асфальтобетона в значительной мере влияют: зерновой состав минеральной смеси, форма и характер поверхности минеральных частиц [12]. Таким образом, прочность и внутреннее трение асфальтобетона выше в смесях с применением острогранных и дробленых частиц.

Одними из направлений повышения прочности композиционных материалов являются физико-химическая и механоактивация. Пути физико-химической активации наполнителей и заполнителей в значительной мере вытекают из уравнения Дюпре-Юнга, учитывающего дополнительно влияние адсорбции паров и структурирующего эффекта твердой поверхности:

$$W_a = v_m - v_m^* (m + \cos\theta), \quad (2.18)$$

где W_a – работа адгезии; v_m – поверхностная энергия твердого тела; v_m^* – свободная поверхностная энергия твердого тела в атмосфере паров или газов; $m = v_{жс}' / v_{жс} > 1$ ($v_{жс}'$ – поверхностное натяжение жидкости, ориентированной под влиянием силового поля твердой поверхности; $v_{жс}$ – поверхностное натяжение смачивающей жидкости); θ – краевой угол смачивания.

Так как поверхностная энергия является составной частью полной энергии твердого тела, то в соответствии с уравнением Гиббса-Гельмгольца свободная удельная поверхностная энергия находится из уравнения

$$U = v - T \partial v / \partial T, \quad (2.19)$$

где U – полная поверхностная энергия; v – поверхностная энергия; $T \partial v / \partial T$ – теплота образования единицы поверхности [169].

Одним из наиболее эффективных способов механоактивации наполнителей и заполнителей является обработка материала, достигаемая дроблением, помолом, истиранием твердых тел. Новые свежееобразованные поверхности за счет образования множества ненасыщенных валентных связей проявляют высокую адгезионную активность. Определенный вклад в повышение активности наполнителя при измельчении дает его аморфизация [170].

2.3 Выводы

1. Из анализа обзора теоретических исследований взаимодействия пористых материалов с органическими вяжущими и процессов структурообразования композиций на их основе были выявлены следующие особенности, которые возможно использовать для улучшения качества и технологичности ЩМА:

– при взаимодействии пористых минеральных материалов с органическим вяжущим веществом (битумом) происходит структурное изменение битума, в ходе которого в зависимости от температуры, количества и размера пор, происходит модификация состава и изменение концентрации, различных по молекулярному весу и реакционной способности компонентов битумного вяжущего (масел, асфальтенов и смол). В результате взаимодействия происходит

процесс избирательной диффузии: в поры материала мигрируют легкие и наименее активные компоненты битума (ароматические углеводороды, масла) и битум обогащается более тяжелыми и активными асфальтенами и смолами. Это дает возможность улучшить взаимодействие минерального заполнителя и наполнителя с вяжущим и, соответственно, повысить физико-механические свойства асфальтобетона;

– приведенные выше особенности взаимодействия пористых тел с органическими вяжущими, позволяют предположить, что модификация щебеночно-мастичных асфальтобетонов пористыми порошковыми материалами (например, керамзитовым или перлитовым порошками) может препятствовать сегрегации ЦМАС. Это обуславливается высокими структурирующей и адсорбционными способностями пористых порошков, которые при взаимодействии с вяжущим могут эффективно сорбировать и удерживать битум на поверхности минерального материала при высоких технологических температурах за счет повышения его вязкости в процессе избирательной фильтрации. Таким образом, снижение количества неструктурированного битума в щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси позволит снизить расслоение (сегрегацию) ЦМАС.

2. В ходе обсуждения работ, посвященных повышению устойчивости и прочности асфальтобетонов при высоких эксплуатационных температурах, выявлено следующее:

– повышение сдвигоустойчивости и прочности асфальтобетона, в том числе и ЦМА, возможно за счет увеличения внутреннего трения и сцепления путем применения в составах асфальтобетонов щебня с остроугольной и гексагональной формой зерен, песка из отсеков дробления;

– применение в щебеночно-мастичных асфальтобетонах пористых высокодисперсных минеральных порошков на основе керамзита или перлита позволит увеличить внутреннее сцепление за счет повышения вязкости битума в процессе избирательной фильтрации. Кроме того, развитая шероховатая острогранная поверхность частиц указанных высокодисперсных пористых

материалов будет способствовать повышению сдвигоустойчивости получаемого материала.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЕРАМЗИТОВЫМ ПОРОШКОМ

3.1 Материалы, принятые к исследованиям

В экспериментальных исследованиях использовали составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, включающие: щебень кубовидной формы из плотных горных пород, песок из отсеков дробления горных пород, активированный минеральный порошок, стабилизирующую добавку из целлюлозных волокон, высокодисперсные отсеки дробления керамзита и перлита, нефтяной дорожный битум.

Использовался щебень и песок из отсеков дробления горных пород производства ГУП СК «Кочубеевский карьер» Ставропольского края. Свойства щебня и песка из отсеков дробления приведены в таблицах 3.1, 3.2 и 3.3, 3.4 соответственно.

Таблица 3.1 – Зерновой состав щебня ГУП СК «Кочубеевский карьер»

Наименование материалов	Зерновой состав (прошло через сито с отверстиями, мм), %			
	20	15	10	5
Щебень фракции 5-10 мм	100	100	92,7	8,2
Щебень фракции 5-15 мм	100	62,9	26,2	8,2
Щебень фракции 5 -20 мм	90,9	46	25,2	2,0

В качестве наполнителя применялся активированный минеральный порошок ЗАО "Известняк" Джегонассского карьера г. Усть-Джегута Карачаево-Черкесской республики. Химический состав исходной породы, из которой был получен активированный (нефтяным битумом по ГОСТ 22245-90) минеральный порошок Усть-Джегутинского ЗАО "Известняк", следующий: CaO – 58,4 %; CO₂ -

38,2 %; SiO_2 – 2,95 %; Al_2O_3 – 0,28 %; MnO – 0,06 %; Na_2O – 0,08 %; K_2O – 0,03 %.

Свойства активированного минерального порошка приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.2 – Свойства щебня ГУП СК «Кочубеевский карьер»

№ п/п	Наименование показателей	Фактические показатели	Требования ГОСТ 8267-93
1	Содержание дробленых зерен по массе, %, не менее	85,8	85
2	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы по массе, %, не более	14,2	15
4	Содержание зерен слабых пород по массе, %, не более	2,78	5
5	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %, по массе не более	0,9	2
6	Содержание глины в комках, % по массе, не более	Нет	0,25
7	Марка по дробимости, не менее	1000	1000
8	Марка по истираемости	И1	И1
9	Марка по морозостойкости, не ниже	F150	F50
10	Марка по пластичности (ГОСТ 25607-94)	Пл1	Пл1 – Пл2
11	Марка по водостойкости (ГОСТ 25607-94)	В1	В1 – В2
12	Насыпная плотность ρ_n , кг/м ³	1326	-

Таблица 3.3 – Зерновой состав песка из отсеков дробления щебня ГУП СК «Кочубеевский карьер»

Наименование материалов	Зерновой состав (прошло через сито с отверстиями, мм), %							
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Песок из отсеков дробления	95	77	53	42,5	28,5	23	14,2	4,1

Таблица 3.4 – Свойства песка из отсеков дробления щебня ГУП СК «Кочубеевский карьер»

№ п/п	Наименование показателей	Фактические показатели	Требования ГОСТ 8736-93
1	Истинная плотность, кг/м ³	2631	-
2	Средняя плотность, кг/м ³	2620	-
4	Насыпная плотность, кг/м ³	1548	-
5	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе, не более	0,94	2
6	Марка по дробимости, не менее	1000	1000
7	Марка по истираемости	И1	И1
8	Марка по морозостойкости, не ниже	F150	F50

Таблица 3.5 – Свойства активированного минерального порошка ЗАО "Известняк" Джегонасского карьера

№ п/п	Наименование показателей	Экспериментальные показатели	Требования ГОСТ Р 52129-2003 для МП-1
1	Зерновой состав, % по массе мельче 1,25 " 0,315 " " 0,071 "	100 98,1 81,7	не менее 100 не менее 90 не менее 80
2	Пористость, % по объему, не более	27	30
3	Набухание образцов из смеси минерального порошка с битумом, %, не более	0,37	1,8
4	Водостойкость образцов из смеси минерального порошка с битумом	0,97	-
5	Показатель битумоемкости, г	58	-
6	Истинная плотность, ρ , кг/м ³	2746	-
7	Средняя плотность уплотненного порошка, ρ_m , кг/м ³	1923	-
8	Насыпная плотность, ρ_n , кг/м ³	1217	-
9	Удельная поверхность, S , см ² /г	3080	-

В качестве вяжущего использовался битум нефтяной дорожный БНД 60/90 производства Саратовского НПЗ. Характеристики битума приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Свойства битума БНД 60/90 Саратовского НПЗ

№ п/п	Показатель	Методы испытаний	Эксперимен- тальные показатели	Требования ГОСТ 22245-90
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм: а) при 25 °С; б) при 0 °С	ГОСТ 11501-78 ГОСТ 11501-78	75 23	61-90 не менее 20
2	Температура размягчения по КиШ, °С	ГОСТ 11506-73	52	не менее 47
3	Растяжимость, см при 25 °С при 0 °С	ГОСТ 11505-75	97 4	не менее 55 не менее 3,5
4	Температура хрупкости по Фраасу, °С	ГОСТ 11507-78	-19	не выше -15
5	Температура вспышки, °С	ГОСТ 4333-87	239	не менее 230
6	Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	ГОСТ 18180-72 ГОСТ 11506-73 с доп. По п.3.3 ГОСТ 22245-90	3	5
7	Индекс пенетрации, ИП	ГОСТ 22245-90 приложения 2	+0,3	От -1,0 до +1,0

В работе применялись стабилизирующие добавки типа Viator-66 (производство ФРГ), представляющие собой гранулы, состоящие из целлюлозных волокон, пропитанные битумом и спрессованные между собой. Добавки испытывались согласно ГОСТ 31015-2002 (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Свойства стабилизирующей добавки Viatop-66

Наименование показателя	Фактические показатели	Значение показателя по ГОСТ 31015-2002
Влажность, % по массе	4,16	не более 8,0
Термостойкость при температуре 220 °С по изменению массы при прогреве, %	3,8	не более 7,0
Содержание волокон длиной от 0,1 мм до 2,0 мм, %	81	не менее 80
Средняя длина гранулы, мм	2-10	-
Растворимость в воде (при 20 °С)	нерастворимы	-

В качестве модификаторов для ЩМАС в исследованиях применялись порошки из керамзита и перлита. Данные порошки представляют собой высокодисперсные отсеvy дробления керамзита и перлита, полученные путем измельчения в лабораторной шаровой мельнице. Для применения в составах ЩМА отбирались фракции менее 0,16 мм. Зерновые составы и свойства предложенных материалов приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Зерновые составы и свойства керамзитового и перлитового порошков

№ п/п	Наименование показателей	Экспериментальные показатели		Требования ГОСТ 52129-2003 для МП-1
		керамзит	перлит	
1	Зерновой состав, % по массе			
	мельче 1,25	100	100	не менее 100
	” 0,315 ”	100	100	не менее 90
	” 0,071 ”	82,5	80,1	не менее 80
2	Пористость, $V_{\text{пор}}$, % по объему, не более	36	42	30
3	Насыпная плотность, ρ_n , г/см ³	0,88	0,28	-
4	Удельная поверхность, S , см ² /г	5280	6453	-
5	Истинная плотность, ρ , г/см ³	2,57	2,24	-

3.2 Методы испытаний

При исследовании свойств порошков из керамзита и перлита, стабилизирующих добавок, асфальтовяжущего, щебеночно-мастичных асфальтобетонов использовались стандартные и нестандартизированные методы.

3.2.1 Методы испытаний порошковых материалов

Удельную поверхность высокодисперсных керамзитового и перлитового порошков определяли с помощью прибора Т-3 (Товарова), рисунок 3.1.

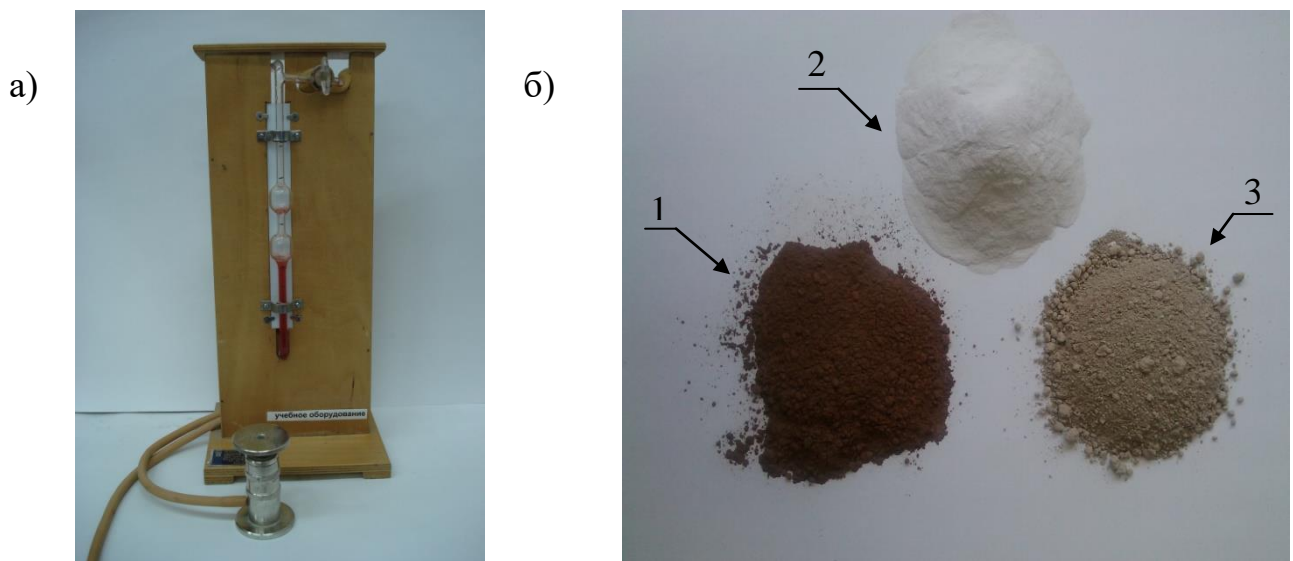


Рисунок 3.1 – а) пневматический поверхностемер Т-3 (общий вид); б) навески проб минеральных порошковых материалов: 1- керамзитовый, 2 - перлитовый, 3- активированный известняковый

В настоящее время хорошо известно, что многие важнейшие свойства физических тел в значительной степени определяются состоянием их поверхности. Свойства поверхностных слоев существенно отличаются от свойств объемного материала, что связано с особенностями их тонкого (атомарного) строения, взаимодействия поверхности с атмосферой и сопрягаемыми телами [173]. Изучение поверхностных слоев является одной из важнейших задач материаловедения, которое решается путем использования современных, удобных и информативных методов исследований. Одними из таких методов являются

атомно-силовая микроскопия (АСМ) и растровая электронная микроскопия (РЭМ).

Для детального изучения структуры и топографии поверхности исследуемых керамзитового, перлитового и активированного известнякового минеральных порошков использовали метод атомно-силовой микроскопии. Достоинством метода исследований АСМ является возможность получения изображения с очень высоким разрешением, а также формирование трехмерного изображения. Данный способ позволяет наблюдать и оперировать малыми объектами строения вещества, такими как атомы.

Исследование микроструктуры минеральных порошков проводили на установке AFM LIFE NT-MDT, производство Россия (рисунок 3.2). Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на взаимодействии острого зонда (кантилевера) с исследуемой поверхностью. Поверхности частиц сканировали прерывисто-контактным методом с использованием кремниевых кантилеверов НА NC (эталон), скорость сканирования 0,5 Гц. Данный режим работы микроскопа основан на использовании Ван-дер-ваальсовых сил притяжения.

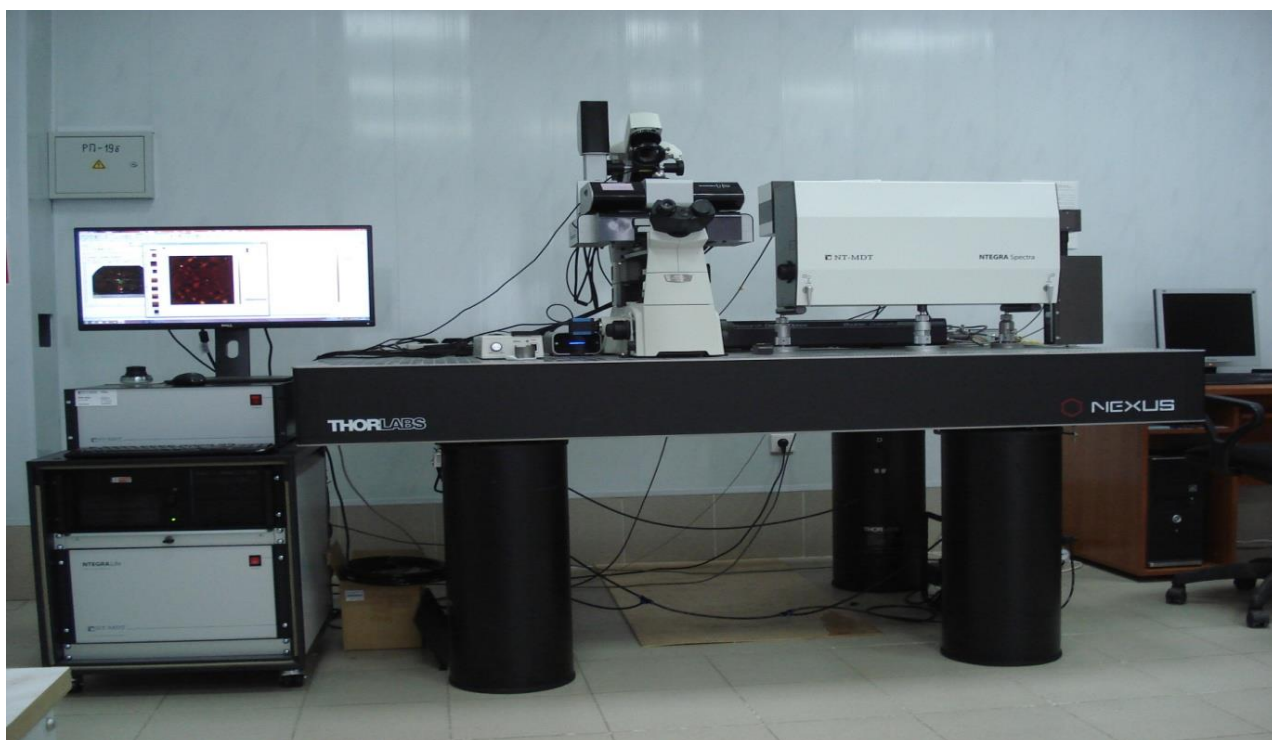


Рисунок 3.2 – Атомно-силовой микроскоп AFM LIFE NT-MDT

Для получения более полного представления о поверхности порошковых материалов были проведены исследования микроструктуры на растровом электронном микроскопе Hitachi TM3000 (Япония, рисунок 3.3). Растровый электронный микроскоп формирует изображение объекта при сканировании его поверхности электронным зондом. Данный метод нашел широкое распространение в порошковой металлургии при исследовании размеров и формы частиц используемых металлических порошков. РЭМ обладают высокой разрешающей способностью, большой глубиной фокуса в сочетании с наглядностью изображения, позволяющей исследовать объекты с ярко выраженным рельефом поверхности. Благодаря высокому качеству изображения и большой глубине резкости появляется возможность наблюдать детали, значительно смещенные по оптической оси.



Рисунок 3.3 – Растровый электронный микроскоп HitachiTM3000

Исследование АСМ и РЭМ позволяют провести качественную оценку топографии, формы, получить представление о размерах частиц, пор, трещин, изучить геометрию поверхности, открытую пористость, объемы пустот, получить трехмерное изображение объекта в высоком разрешении.

Дисперсность применяемых в работе пористых порошковых минеральных материалов (их интегральное и дифференциальное распределение) определяли с помощью лазерного анализатора размеров частиц ЛАСКА-Т (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Лазерный анализатор размеров частиц ЛАСКА-Т

3.2.2 Методы испытаний стабилизирующих добавок

Для стабилизирующих добавок определяли следующие показатели: влажность и термостойкость.

Влажность W и термостойкость T_b волокон стабилизирующих добавок для ЩМА определяли согласно ГОСТ 31015-2002:

– влажность волокон W , %:

$$W = \frac{g_2 - g_3}{g_3 - g_1} 100, \quad (3.1)$$

где g_1 — вес противня, г; g_2 — вес противня с волокнами, г; g_3 — вес противня с волокнами после сушки в сушильном шкафу, г;

– термостойкость волокон T_b , %:

$$T_b = \frac{g_3 - g_4}{g_3 - g_1} 100, \quad (3.2)$$

где g_4 — вес противня с волокнами после выдерживания в сушильном шкафу при температуре $(220 \pm 3)^\circ\text{C}$, г.

3.2.3 Методы испытаний вяжущего

Применяемые в исследованиях битумы нефтяные дорожные испытывали в соответствии с требованиями ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия» согласно методам испытаний битумов. (ГОСТ 11501-78, ГОСТ 11506-73, ГОСТ 18180-72, ГОСТ 11501-78, ГОСТ 11507-78).

3.2.4 Методы испытаний асфальтовязующих

В работе исследовали следующие асфальтовязующие для ЩМАС. Битум + активированный минеральный порошок; битум + активированный минеральный порошок, модифицированный керамзитовым порошком; битум + активированный минеральный порошок, модифицированный перлитовым порошком. Для исследуемых асфальтовязующих определяли следующие свойства: пенетрацию на автоматическом пенетрометре марки ПН-10Б согласно (ГОСТ 11501-78), температуру размягчения по КиШ на приборе кольцо и шар марки КиШ-20М4 (ГОСТ 11506-73).

3.2.5 Методы испытаний ЩМА

Устойчивость смеси к расслаиванию определяли согласно ГОСТ 31015-2002. Для этого приготовленную щебеночно-мастичную асфальтобетонную смесь помещали в стакан и выдерживали в течение 60 ± 1 мин в сушильном шкафу при температуре 170°C . Затем извлекали стакан и удаляли смесь, перевернув стакан вверх дном, не встряхивая, на 10 ± 1 секунд. Затем охлаждали стакан в течение 10 мин и взвешивали с остатками вяжущего и смеси, прилипшей к его внутренней поверхности.

Стекание вяжущего B , %, определяли по формуле

$$B = \frac{g_3 - g_1}{g_2 - g_1} 100, \quad (3.3)$$

где g_1 , g_2 , g_3 — масса стакана соответственно пустого, со смесью и после ее удаления, г.

Прочность и теплостойкость щебеночно-мастичных асфальтобетонов оценивались по ГОСТ 12801-98 по пределам прочности при сжатии образцов ЩМА при температурах 0 °C (R_0), 20 °C (R_{20}) и 50 °C (R_{50}). Образцы испытывались на электромеханическом прессе для испытания дорожно-строительных материалов ДТС 06-50/100 (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Электромеханический пресс ДТС 06-50/100.

Водостойкость ЩМА оценивали по значениям показателей водонасыщения W , набухания H , водостойкости k_g и водостойкости при длительном водонасыщении k_{60} согласно ГОСТ 12801-98.

Испытывали образцы асфальтобетона из смесей ЩМА-10 и ЩМА-15, изготовленные в стандартных стальных цилиндрических формах диаметром 71,4 мм, которые уплотняли вибрированием с последующим доуплотнением прессованием на гидравлическом прессе МС-1000 согласно ГОСТ 12801-98.

3.2.6 Определение реологических характеристик ЩМА

Асфальтобетон при различных термоциклических, динамических, климатических воздействиях (нагрев, охлаждение, транспортные нагрузки, увлажнение и т.п.) ведет себя как упруго-вязко-пластичное тело. Поэтому при расчете и проектировании асфальтобетонных покрытий важно учитывать

температурное влияние на их деформативность. Напряженно-деформированное состояние асфальтобетона наиболее полно описывает реология – наука о течении материалов. В ходе экспериментальных исследований определяли следующие реологические параметры исследуемых ЩМА: коэффициент вязкости η_m , коэффициент вязкой податливости γ , время релаксации θ , время ретардации τ , кинетические характеристики P_1 , P_2 и P_1/P_2 , модули упругости E . Реологические параметры асфальтобетона определяли по методике Я.Н. Ковалева [12]. С этой целью изготавливали цилиндрические образцы щебеночно-мастичных асфальтобетонов двух марок ЩМА-10 и ЩМА-15 размерами 71,5×71,5 мм. Образцы подвергались испытанию на сжатие при различных температурах. Для расчета реологических характеристик измеряли геометрические параметры образцов (высоту и диаметр) до и после испытания, а также фиксировали предел прочности при сжатии. Скорость движения плиты пресса при испытании принимали $v = 0,005$ см/с.

Реологические параметры рассчитывали по формулам:

– коэффициент вязкости

$$\eta_m = 400R \frac{h_1^2 \Delta h}{\Delta d^2}, \quad (3.4)$$

где R – предел прочности при сжатии, МПа; h_1 – высота образца до испытания, см; Δh – разность высот образца до и после испытания ($\Delta h = h_1 - h_2$), см; Δd – разность диаметров до и после испытания ($\Delta d = d_1 - d_2$), см;

– коэффициент вязкой податливости

$$\gamma = 400R \frac{\Delta h \Delta d}{R h_1}, \quad (3.5)$$

– время релаксации

$$\theta = 400 \frac{h_1 \Delta h^2}{\Delta d^2}, \quad (3.6)$$

– время ретардации

$$\tau = 1000 \frac{\Delta d}{h_1}, \quad (3.7)$$

– кинетические характеристики

$$P_1 = -0,00125 \frac{\Delta d^2}{h_1 \Delta h^2}, \quad (3.8)$$

$$P_2 = -0,002 \frac{h_1}{d_1 \Delta d}, \quad (3.9)$$

где d_1 – диаметр образца до испытания, см.

$$\frac{P_1}{P_2} = 0,62 \frac{\Delta d^3}{\Delta h^2 h_1^2}, \quad (3.10)$$

3.2.7 Методы определения эксплуатационных характеристик ЩМА

Морозостойкость исследуемых ЩМА определяли согласно методике изложенной в ГОСТ 12801-98.

Сдвигоустойчивость ЩМА оценивалась по ГОСТ 12801-98 по показателям коэффициента внутреннего трения $tg\varphi$ и сцепления при сдвиге C_π . Для этого определяли максимальные нагрузки при одновременном измерении соответствующих предельных деформаций стандартных цилиндрических образцов при одноосном сжатию и сжатию специальным обжимным устройством по схеме Маршала.

Трещиностойкость оценивали по пределу прочности на растяжение при расколе R_p испытанием образцов-цилиндров диаметром и высотой $71,4 \pm 1,5$ мм по ГОСТ 12801-98.

Определение износостойкости разработанных ЩМА проводили путем оценки истираемости образцов ШМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, на приборе ЛКИ-3М, предназначенном для определения истираемости бетона и износостойкости неглазурованных керамических плиток. Эрозионные характеристики материалов (истираемость бетона по ГОСТ 13087-81 и износостойкость неглазурованных керамических плиток по ГОСТ 27180-2001) оцениваются величиной уноса массы испытуемого образца с единицы площади поверхности соприкосновения образца с

истирающим телом. Указанные стандарты задают требования к конструктивным параметрам прибора и к условиям выполнения измерений.

Сущность метода заключается в измерении потери массы испытуемого образца при трении о вращающийся в горизонтальной плоскости истирающий диск, изготовленный из серого чугуна. На истирающую поверхность диска насыпается абразивный материал. К испытуемому образцу прикладывается вертикальная нагрузка в 0,06 МПа. Потеря массы оценивается взвешиванием образцов до и после испытания прохождения заданного стандартами пути истирания (числа оборотов диска).

Истираемость асфальтобетона на круге истирания G в г/см^2 , характеризующую потерей массы образца, определяли с погрешностью до 0,1 г/см^2 для отдельного образца по формуле

$$G = \frac{m_1 - m_2}{F} \quad (3.11)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после 4 циклов испытания, г; F – площадь истираемой грани образца, см^2 .

Долговечность щебеночно-мастичных асфальтобетонов определяли по методике, изложенной в работе Ю. И. Калгина [148], сущность которого заключается в следующем. На первом этапе моделировали старение при технологическом процессе приготовления ЩМА. При этом смеси готовили при предельно высокой температуре 175-180 °С и выдерживали при этой температуре в течение 30 мин перед формовкой, затем изготавливали образцы. Для определения начальных физико-механических свойств часть изготовленных образцов испытывали по ГОСТ 12801-98. На втором этапе образцы прогревали в термостате при температуре 70 °С по 10 часов в течение месяца, что сопоставимо старению асфальтобетонного покрытия при эксплуатации в жаркие дни летнего сезона. В ходе третьего этапа исследования долговечности образцы ЩМА водонасыщали сначала под вакуумом в течение 1,5 ч, а затем 30 суток выдерживали в воде. Далее образцы помещались в климатическую камеру и

подвергались попеременному замораживанию и оттаиванию при температуре -20°C в течение 4 часов и $+20^{\circ}\text{C}$ в течение 4 часов соответственно. Испытания проводили с использованием климатической камеры «СМ – $-70/100 - 120\text{TBX}$ » (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Климатическая камера «СМ – $-70/100 - 120\text{TBX}$ »

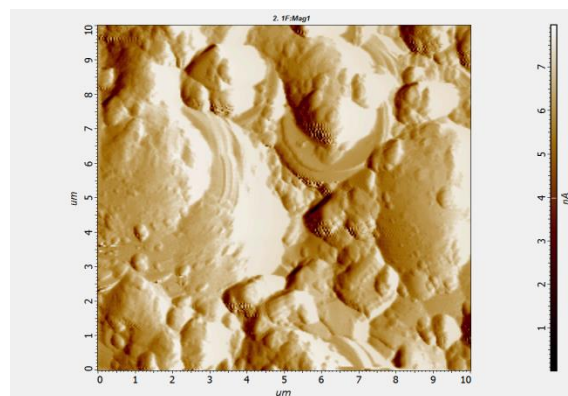
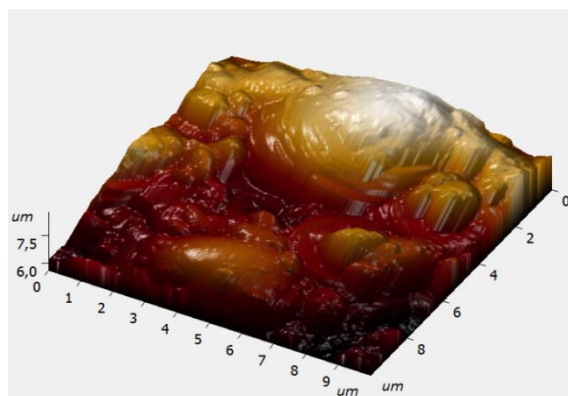
После 25, 50 и 100 циклов замораживания и оттаивания определяли физико-механические свойства образцов. Данные этапы исследования долговечности моделируют один условный год эксплуатации щебеночно-мастичного асфальтобетона в дорожном покрытии. Старение ЩМА оценивали по потере прочности при испытании при 20°C (R_{20}) и 50°C (R_{50}), а так же по изменению водонасыщения, водостойкости k_g и водостойкости при длительном водонасыщении k_{60} .

3.3 Исследование особенностей топографии поверхности и дисперсности пористых порошковых материалов

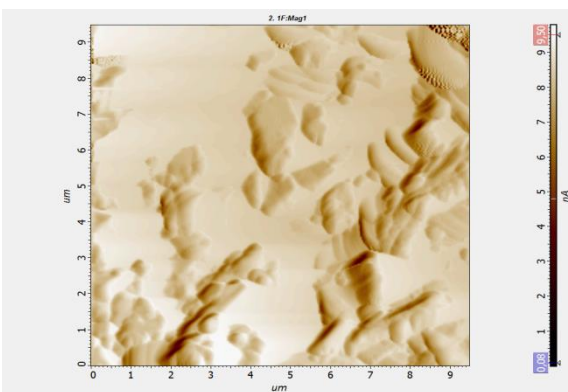
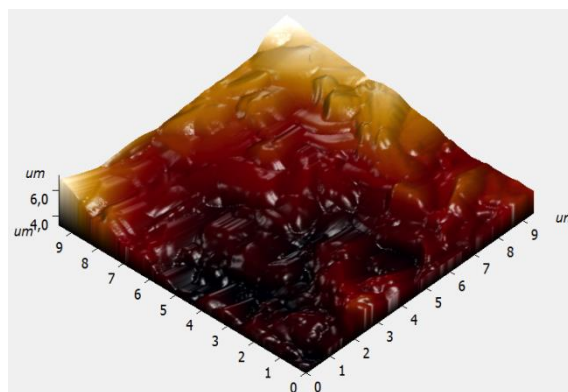
Для изучения топографии и микрорельефа поверхности исследуемых пористых порошков на основе керамзита, перлита и известняка использовали методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Микрофотографии поверхностей частиц исследуемых порошков, полученные методом АСМ, представлены на рисунке 3.7.

а)



б)



в)

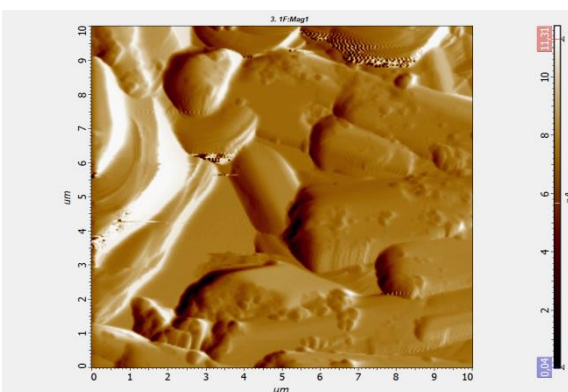
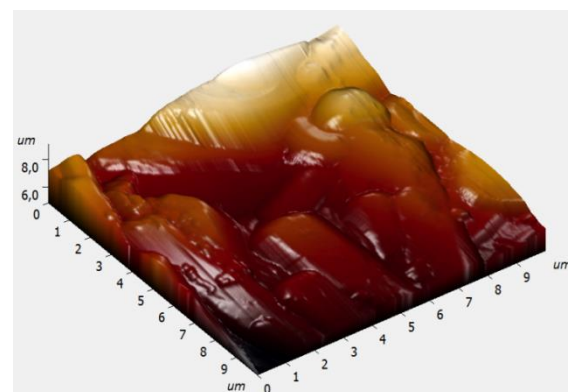


Рисунок 3.7 – 3d и 2d фотографии поверхности частиц минеральных порошков полученные на атомно-силовом микроскопе (разрешение 10 мкм):
а) керамзитовый порошок, б) активированный минеральный порошок,
в) перлитовый порошок.

Из анализа микрофотографий поверхностей минеральных частиц (рисунок 3.7) следует, что наиболее развитую поверхность имеет керамзитовый порошок. Микрорельеф микрочастиц керамзита характеризуется большим количеством неровностей, впадин, пиков, пор, высокой шероховатостью. Поверхность частиц перлита обладает чешуйчатой структурой. Активированный минеральный

порошок, имеет более сглаженную поверхность с меньшим размером возвышений и углублений.

Микрофотографии поверхностей частиц исследуемых порошков, полученных методом РЭМ, представлены на рисунке 3.8.

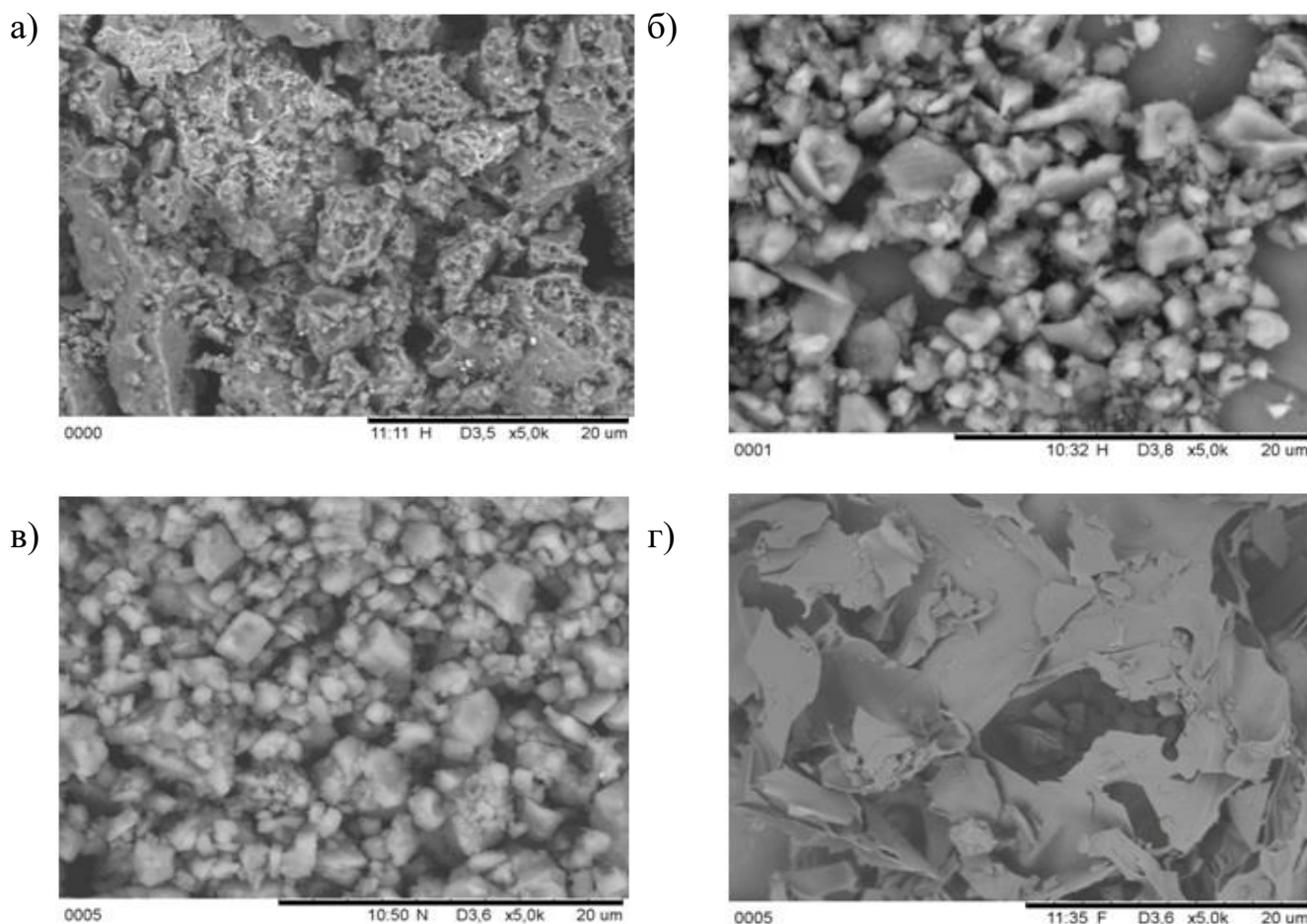


Рисунок 3.8 – Микрофотографии поверхностей частиц минеральных порошков полученные на растровом электронном микроскопе: а) керамзитовый порошок, б) активированный минеральный порошок, в) неактивированный минеральный порошок, г) перлитовый порошок.

Анализ микрофотографий РЭМ (рисунок 3.8) показал следующее. Поверхность частиц активированного и неактивированного минеральных порошков имеет лишь неровности и углубления. Поверхность перлита представляет собой плоские частицы чешуйчатой или хлопьевидной формы с большим объемом пустот. Поверхность микрочастиц керамзита имеет развитую открытую пористость, раковистость, поры преимущественно овальной формы,

также встречаются узкие щелевидные поры, изометрические поры похожие на каналы. Согласно анализу электронных фотографий керамзитового порошка большая часть пор (около 65-70%) имеет размеры 1-3 мкм, около 10-15 % пор имеют размеры 4-6 мкм, присутствуют также крупные поры (5-10 %) размерами 6-10 мкм, около 5 % пор обладают размерами менее 1 мкм (рисунок 3.8).

Исходя из анализа исследований микрофотографий АСМ и РЭМ, можно с уверенностью утверждать, что из представленных материалов частицы керамзитового порошка обладают наиболее развитой поверхностью, большим количеством различных по размерам, форме и конфигурации пор, повышенной шероховатостью и множественными неровностями. Это позволяет предположить, что за счет этих особенностей структуры поверхности керамзитовый порошок будет обладать наибольшей удельной поверхностью, что гарантирует высокую адсорбционную и структурирующую способности к вяжущему в сравнении с известняковым и перлитовым порошками.

Зерновой состав, дифференциальное и интегральное распределение частиц исследуемых порошковых материалов определяли на лазерном анализаторе размеров частиц ЛАСКА-Т. Результаты испытаний приведены в таблице 3.9, рисунках 3.9, 3.10.

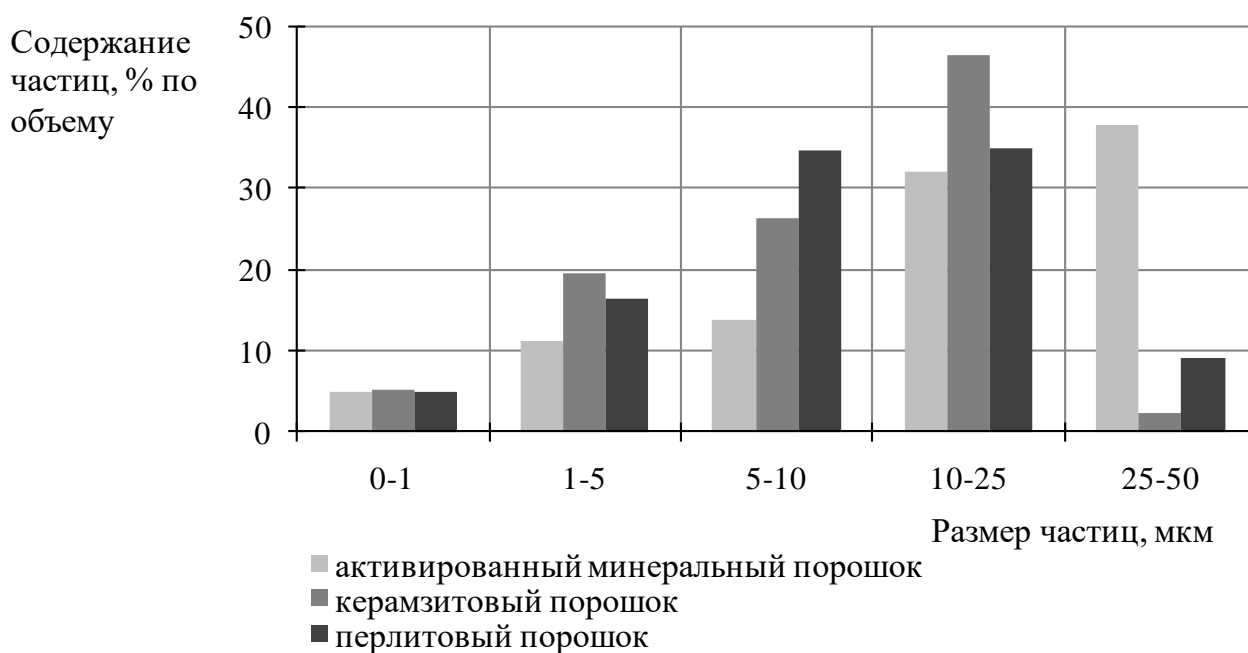


Рисунок 3.9 – Дифференциальное распределение частиц по объему (лазерный анализатор частиц ЛАСКА-Т)

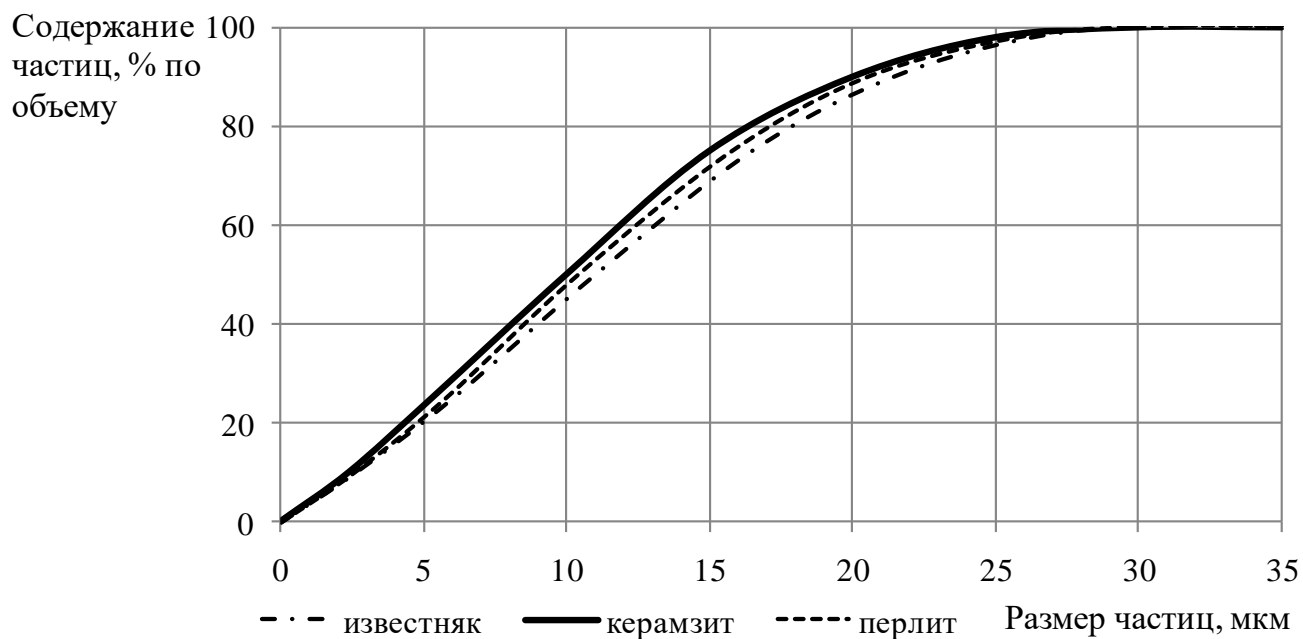


Рисунок 3.10 – Интегральное распределение частиц по объему (лазерный анализатор частиц ЛАСКА-Т)

Таблица 3.9 – Дифференциальное и объемное распределение частиц исследуемых порошков

Дифференциальное распределение частиц по объему		
размерность класса, мкм	керамзитовый порошок, %	активированный минеральный порошок, %
0-1	5,3	4,96
1-5	19,6	11,07
5-10	26,31	13,92
10-25	46,48	32,14
25-50	2,31	37,91
Интегральное распределение частиц по объему		
распределение по объему, %	диаметр частиц, мкм	
10	2,58	2,48
25	6,499	6,14
50	10,18	12,97
75	15,49	16,05
90	20,22	21,49
99	25,82	28,36
Удельная поверхность, $S_{уд}$, $см^2/г$	5280	3080

В результате проведенных исследований установлена повышенная дисперсность керамзитового и перлитового порошков по сравнению с дисперсностью активированного известнякового минерального порошка. Преобладающий размер частиц керамзита (72 %) и перлита (69 %) находятся в пределах от 5 до 25 мкм, а минерального порошка – от 10 до 50 мкм (70 %). Удельная поверхность керамзитового и перлитового порошков более чем в 1,7 - 2 раза превышает удельную поверхность известнякового минерального порошка.

Таким образом, можно предположить, что за счет большей дисперсности и удельной поверхности керамзитовый и перлитовый порошки будут более активно взаимодействовать с вяжущим и обладать большей адгезионной способностью, чем минеральный порошок, что может способствовать повышению физико-механических и эксплуатационных свойств материала.

3.4 Исследование свойств асфальтовяжущих

Исследование адсорбционной активности и взаимодействие пористых порошковых материалов с битумом изучалась в работах Высоцкой М.А., Кузнецова Д.К., Солдатов А.А. [149-151]. В результате исследований были выявлены высокие адсорбционные показатели пористых порошковых материалов к битуму. Модификация асфальтовяжущего высокодисперсными пористыми материалами позволяет увеличить его вязкость и температуру размягчения, что объясняется хорошей адсорбционной и структурирующей способностью этих материалов.

С целью выявления возможности использования добавок из пористых порошковых материалов в ЩМА исследовали свойства асфальтовяжущих, модифицированных порошками из керамзита и перлита, для сравнения определяли свойства асфальтовяжущих на стандартном активированном минеральном порошке. Были приняты следующие составы асфальтовяжущих: битум и активированный известняковый минеральный порошок; битум и активированный известняковый минеральный порошок, модифицированный керамзитовым порошком (в соотношении 50 × 50 %); битум и активированный

известняковый минеральный порошок, модифицированный перлитовым порошком (в соотношении 50 × 50 %). Определяли пенетрацию и температуру размягчения при оптимальном содержании порошков керамзита и перлита. Результаты испытаний приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Свойства модифицированных асфальтовяжущих

Вид асфальтовяжущего	Глубина проникания иглы, 0,1 мм		Температура размягчения по кольцу и шару, °С
	при 0 °С	при 25 °С	
Битум БНД 60/90 и активированный известняковый минеральный порошок	20	51	68,5
Битум БНД 60/90 и активированный известняковый минеральный порошок, модифицированный перлитовым порошком	20	48	70,1
Битум БНД 60/90 и активированный известняковый минеральный порошок, модифицированный керамзитовым порошком	20	43	76,4

Согласно полученным результатам модификация вяжущего перлитом и керамзитом приводит к снижению пенетрации при 25 °С на 5,9 % и 15,7 % соответственно. При температуре 0 °С показатели пенетрации равны. Температура размягчения по КиШ для составов асфальтовяжущего, модифицированных порошками перлита и керамзита, увеличилась соответственно на 2,3 % и 11,5 %. Включение пористых порошков в асфальтовяжущее приводит к значительному повышению вязкости и структурирования битума, по всей видимости, вследствие избирательной фильтрации компонентов вяжущего в поры материала. Согласно полученным данным наибольшей структурирующей способностью и наибольшим влиянием на изменение свойств асфальтовяжущего обладает керамзитовый порошок.

3.5 Составы ЩМА, принятые к исследованиям

Асфальтобетон, используемый для строительства верхних слоев дорожных покрытий, должен обладать высокими эксплуатационными характеристиками: водостойкостью, морозостойкостью, устойчивостью к деформациям при различных температурах, износостойкостью, шероховатостью. Помимо этого, асфальтобетонные покрытия должны иметь высокие показатели прочности, теплостойкости, сдвигоустойчивости.

Щебеночно-мастичные асфальтобетоны должны удовлетворять вышеуказанным требованиям и обладать высокими эксплуатационными и физико-механическими показателями. Был проведен подбор оптимальных составов ЩМАС для исследований, который заключался: в подборе и оптимизации минеральной части щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей согласно кривым гранулометрических составов, рекомендуемых ГОСТ 31015-2002; в подборе процентного содержания битума; подборе оптимального количества стабилизирующей добавки для ЩМАС.

Были запроектированы смеси ЩМА следующих марок: ЩМА-10 и ЩМА-15. Гранулометрические составы исследуемых ЩМА представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Гранулометрические составы ЩМА-10 и ЩМА-15

Марка ЩМА	Размер зерен, мельче данного размера, мм									
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
ЩМА-10	100	100	94	34	24	20	18	16	14	12
ЩМА-15	100	95	48	28	21	17	14	12	11	10

Разработка составов ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных пористыми порошковыми материалами, велась по следующим двум схемам:

1) пористые порошки вводили в состав ЩМАС как модифицирующую добавку, сверх массы минеральной части смеси (взамен стандартной Viator-66);

2) пористые порошки вводили в ЩМАС с целью модификации как часть минерального наполнителя (т.е. заменяли часть объемной доли активированного известнякового порошка на соответствующий объем пористого).

Для сравнения приготавливали и испытывали смеси стандартных составов ЩМА с использованием традиционных стабилизирующих добавок Viator-66. Свойства ЩМА-10 и ЩМА-15 различных составов приведены в таблицах 3.12 и 3.13 соответственно.

Анализируя полученные результаты предварительных исследований, выявлено, что наиболее высокими показателями пределов прочности при сжатии, водостойкости и сдвигоустойчивости обладают ЩМА, модифицированные керамзитовым порошком (см. состав № 1 табл. 3.12; состав № 5 табл. 3.13). Прочность образцов ЩМА, модифицированных перлитовым порошком (см. составы № 2 таблица 3.12 и № 6 таблица 3.13), ниже прочности ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком. Выявлено, что водостойкость у ЩМА с применением перлита ниже, чем у ЩМА с применением керамзита, но выше водостойкости ЩМА на Viator-66 (см. составы № 4 таблица 3.12 и № 8 таблица 3.13). Показатели сдвигоустойчивости и стекания исследуемых составов практически равны. При замене части минерального порошка керамзитовым порошком наблюдается устойчивое снижение свойств ЩМА (см. составы № 3 таблица 3.12 и № 7 таблица 3.13).

В ходе предварительного анализа экспериментальных исследований за оптимальный вариант были приняты составы № 1 и № 5 (см. табл. 3.12 и 3.13), соответственно, в которых применяется керамзитовый порошок в качестве модификатора ЩМА. Использование в ЩМА перлитового порошка, а также замена части наполнителя (известнякового минерального порошка) керамзитовым порошком, менее эффективны вследствие значительного снижения прочности, сдвигоустойчивости, водостойкости ЩМА.

Таблица 3.12 – Свойства ЦМА-10 различных составов

Наименование показателя	Состав № 1 (керамзитовый порошок как модификатор, % масс.)	Состав № 2 (перлитовый порошок как модификатор, % масс.)	Состав № 3 (замена части минерального порошка керамзитовым порошком, % по объему)			Состав № 4 (Стабилизирующая добавка Viatop-66, % масс)	Значение показателя согласно ГОСТ 31015-2002
			10	20	30		
Водостойкость, k_g	0,96	0,94	0,92	0,91	0,89	0,9	$\geq 0,9$
Водостойкость при длительном водонасыщении, k_{gd}	0,86	0,81	0,78	0,76	0,75	0,79	$\geq 0,75$
Показатель стекания вяжущего, B , %:	0,12	0,11	0,13	0,13	0,12	0,1	$\leq 0,2$
Коэффициент внутреннего трения, $tg\varphi$	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,94	$\geq 0,94$
Сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, C_{π} , МПа	0,26	0,22	0,23	0,22	0,22	0,24	$\geq 0,2$
Предел прочности при сжатии, МПа:							
при 0°С, R_0	8,34	7,1	7,4	7,26	7,18	7,6	≤ 13
при 20°С, R_{20}	4,47	3,64	4,02	3,85	3,68	4,2	$\geq 2,5$
при 50 °С, R_{50}	1,88	1,34	1,46	1,35	1,25	1,8	$\geq 0,7$

Таблица 3.13 – Свойства ЦМА-15 различных составов

Наименование показателя	Состав № 5 (керамзитовый порошок как модификатор, % масс.)	Состав № 6 (перлитовый порошок как модификатор, % масс.)	Состав № 7 (замена части минерального порошка керамзитовым порошком, % по объему)			Состав № 8 (Стабилизирующая добавка Viatorp-66, % масс)	Значение показателя согласно ГОСТ 31015-2002
			10	20	30		
Водостойкость, k_g	0,98	0,94	0,93	0,92	0,9	0,92	$\geq 0,9$
Водостойкость при длительном водонасыщении, $k_{гд}$	0,9	0,83	0,79	0,78	0,76	0,82	$\geq 0,75$
Показатель стекания вяжущего, B , %:	0,11	0,1	0,13	0,13	0,11	0,09	$\leq 0,2$
Коэффициент внутреннего трения, $tg\varphi$	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,95	$\geq 0,94$
Сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, C_{π} , МПа	0,28	0,23	0,22	0,22	0,21	0,24	$\geq 0,2$
Предел прочности при сжатии, МПа:							
при 0°С, R_0	9,11	7,69	7,73	7,54	7,3	7,8	≤ 13
при 20°С, R_{20}	4,67	3,92	4,12	3,91	3,88	4,3	$\geq 2,5$
при 50 °С, R_{50}	1,91	1,49	1,52	1,44	1,29	1,85	$\geq 0,7$

3.6 Математическое планирование эксперимента

Для более рационального подбора смеси, а также оптимизации составов ЩМАС и прогнозирования свойств ЩМА было проведено математическое планирование эксперимента. С этой целью был реализован трехфакторный эксперимент с последующим выводом уравнений регрессии. В качестве независимых факторов приняты: x_1 – содержание керамзитового порошка сверх 100 % массы смеси (C_k), x_2 – содержание битума марки БНД 60/90 сверх 100 % массы смеси (C), x_3 – температура приготовления смеси (T_n) °С.

Минимальные, максимальные и средние значения принятых факторов, а также их интервалы варьирования приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Характеристика принятых факторов

Варьирование факторов	x_1 , %	x_2 , %	x_3 , °С
Нижний уровень ($x_i = +1$)	0	5,5	155
Верхний уровень ($x_i = -1$)	5	7,5	175
Центр плана (x_{0i})	2,5	6,5	165
Интервал варьирования (x_i)	2,5	1	10

Планирование эксперимента проводилось для ЩМА-10 и ЩМА15. Исследовали характеристики предела прочности при сжатии при 0 °С (R_0 , МПа) – y_1 , предела прочности при сжатии при 20 °С (R_{20} , МПа) – y_2 , предела прочности при сжатии при 50 °С (R_{50} , МПа) – y_3 , показатель водонасыщения W , % – y_4 , водостойкость k_g – y_5 , водостойкость при длительном водонасыщении $k_{гд}$ – y_6 , набухание H , % – y_7 , показатель стекания вяжущего B , % – y_8 .

Матрица эксперимента, закодированные и натуральные переменные представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Матрица эксперимента

№ опыта	План эксперимента			Натуральные переменные		
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	+1	+1	+1	5	7,5	175
2	-1	+1	+1	0	7,5	175
3	+1	+1	-1	5	7,5	155
4	-1	+1	-1	0	7,5	155
5	-1	-1	+1	0	5,5	175
6	+1	-1	-1	5	5,5	155
7	+1	-1	+1	5	5,5	175
8	-1	-1	-1	0	5,5	155
9	0	0	0	2,5	6,5	165
10	0	0	-1	2,5	6,5	155
11	-1	0	0	0	6,5	165
12	0	-1	0	2,5	5,5	165
13	0	0	+1	2,5	6,5	175
14	+1	0	0	5	6,5	165
15	0	+1	0	2,5	7,5	165

Значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в таблицах 3.16, 3.17.

В таблицах 3.18, 3.19 даны показатели исследуемых свойств ЩМА-10 и ЩМА-15, полученные экспериментальным путем, а также значения этих показателей, вычисленные по полученным уравнениям регрессии.

Таблица 3.16 – Коэффициенты уравнений регрессии для исследуемых функций отклика ЩМА-10

Функция отклика	Коэффициенты уравнения регрессии									
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
$y_1 (R_0)$	8,7451	0,253	0,178	0,12	-0,02875	-0,01125	-0,00375	-0,3338	-0,3338	-0,3188
$y_2 (R_{20})$	4,6651	0,196	0,154	0,093	-0,04125	-0,01625	-0,02125	-0,2588	-0,2788	-0,2738
$y_3 (R_{50})$	1,8666	0,092	0,066	0,025	-0,015	-0,0025	-0,0075	-0,0833	-0,1033	-0,0483
$y_4 (W)$	2,2477	0,193	-0,081	-0,037	0,02375	0,04125	0,03875	-0,03722	-0,1172	-0,0072
$y_5 (k_e)$	0,974	0,009	0,01	0,003	0,00125	-0,00125	0,00125	-0,025	-0,02	-0,015
$y_6 (k_{60})$	0,8668	0,019	0,018	0,012	-0,00125	-0,00375	0,00125	-0,0261	-0,0311	-0,0111
$y_7 (H)$	0,3584	0,13	-0,068	-0,006	-0,045	-0,0025	-0,005	0,0744	-0,0555	-0,0055
$y_8 (B)$	0,0868	-0,026	0,014	0,022	0,0175	0,01	-0,0075	0,0288	0,0288	0,0388

Таблица 3.17 – Коэффициенты уравнений регрессии для исследуемых функций отклика ЩМА-15

Функция отклика	Коэффициенты уравнения регрессии									
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
$y_1 (R_0)$	9,4213	0,327	0,167	0,1300	0,08125	0,09875	-0,13625	-0,54166	-0,3016	-0,5166
$y_2 (R_{20})$	4,8466	0,175	0,086	0,68	0,04125	0,05125	-0,06875	-0,30833	-0,1333	-0,3233
$y_3 (R_{50})$	1,9784	0,057	0,054	0,023	-0,0275	-0,0025	-0,0025	-0,09055	-0,0755	-0,1205
$y_4 (W)$	2,2786	0,191	-0,074	-0,034	0,0125	0,03	0,0025	0,00166	-0,1133	-0,0033
$y_5 (k_e)$	0,9873	0,011	0,008	0,004	0,00125	0,00375	-0,00125	-0,03166	-0,0066	-0,0266
$y_6 (k_{60})$	0,8857	0,016	0,011	0,005	-0,0025	0,0025	-0,0025	-0,04222	-0,0072	-0,03722
$y_7 (H)$	0,38844	0,14	-0,061	-0,016	-0,035	-0,0125	-0,0125	0,06444	-0,06055	0,0144
$y_8 (B)$	0,07777	-0,024	0,014	0,017	0,0175	0,01	-0,005	0,02777	0,02777	0,04277

Таблица 3.18 – Значения физико-механических свойств ЩМА-10

№ опы- та	Функция отклика, у							
	предел прочности при сжатии при 0 °С, МПа	предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа	предел прочности при сжатии при 50 °С, МПа	показатель водонасы- щения, %	водостой- кость	водостой- кость при длительном водонасыще- нии	набухание, %	показатель стекаания вяжущего, %
1	8,25/8,26	4,25/4,22	1,8/1,79	2,22/2,26	0,94/0,93	0,84/0,84	0,34/0,38	0,2/0,21
2	8,01/7,83	4,06/3,94	1,68/1,64	1,76/1,74	0,92/0,91	0,83/0,81	0,22/0,21	0,23/0,21
3	8,16/8,05	4,19/4,11	1,76/1,75	2,26/2,18	0,93/0,93	0,84/0,82	0,41/0,4	0,18/0,16
4	7,42/7,57	3,69/3,76	1,59/1,6	1,75/1,83	0,91/0,9	0,77/0,78	0,2/,023	0,19/0,2
5	7,31/7,42	3,52/3,59	1,5/1,49	1,8/1,88	0,9/0,89	0,76/0,77	0,26/0,27	0,22/0,23
6	7,56/7,74	3,73/3,84	1,61/1,64	2,36/2,37	0,91/0,91	0,78/0,79	0,61/0,62	0,07/0,08
7	8,12/7,99	4,12/4,03	1,72/1,7	2,38/2,3	0,91/0,91	0,82/0,8	0,64/0,61	0,18/0,16
8	7,16/7,15	3,31/3,33	1,42/1,42	2,16/2,11	0,89/0,88	0,75/0,74	0,3/0,26	0,21/0,19
9	8,67/8,74	4,75/4,66	1,92/1,88	2,25/2,24	0,97/0,98	0,87/0,87	0,37/0,35	0,11/0,09
10	8,54/8,31	4,42/4,3	1,84/1,79	2,24/2,28	0,96/0,95	0,85/0,84	0,35/0,36	0,1/0,1
11	8,26/8,16	4,26/4,21	1,66/1,69	2,21/2,02	0,94/0,94	0,83/0,82	0,29/0,3	0,13/0,14
12	8,38/8,23	4,35/4,23	1,71/1,69	2,18/2,21	0,95/0,94	0,83/0,81	0,32/0,37	0,1/0,1
13	8,35/8,54	4,32/4,48	1,77/1,84	2,24/2,2	0,96/0,97	0,86/0,87	0,35/0,34	0,14/0,15
14	8,6/8,66	4,51/4,6	1,88/1,87	2,3/2,3	0,96/0,95	0,85/0,86	0,57/0,56	0,09/0,08
15	8,47/8,58	4,38/4,54	1,79/1,83	2,08/2,05	0,96/0,97	0,84/0,85	0,28/0,23	0,12/0,13

В числителе – экспериментальные данные, в знаменателе - вычисленные

Таблица 3.19 – Значения физико-механических свойств ЩМА-15

№ опы- та	Функция отклика, у							
	предел прочности при сжатии при 0 °С, МПа	предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа	предел прочности при сжатии при 50 °С, МПа	показатель водонасы- щения, %	водостой- кость	водостой- кость при длительном водонасыще- нии	набухание, %	показатель стекания вяжущего, %
1	8,76/8,73	4,44/4,43	1,81/1,79	2,25/2,28	0,95/0,94	0,83/0,82	0,37/0,4	0,19/0,19
2	7,8/7,72	3,95/3,89	1,76/1,73	1,84/1,82	0,92/0,91	0,8/0,79	0,25/0,22	0,22/0,21
3	8,67/8,54	4,39/4,33	1,79/1,75	2,36/2,29	0,94/0,93	0,82/0,9	0,53/0,49	0,18/0,16
4	7,79/7,93	3,94/4,0	1,68/1,69	1,89/1,94	0,92/0,91	0,8/0,79	0,22/0,25	0,18/0,15
5	7,64/7,82	3,86/3,95	1,54/1,58	1,93/1,99	0,9/0,9	0,77/0,77	0,27/0,3	0,2/0,19
6	7,64/7,78	3,86/3,94	1,67/1,7	2,41/2,42	0,91/0,92	0,79/0,8	0,64/0,65	0,07/0,08
7	8,59/8,51	4,35/4,31	1,75/1,74	2,47/2,41	0,93/0,93	0,81/0,82	0,67/0,66	0,17/0,1
8	7,4/7,48	3,74/3,78	1,5/1,53	2,17/2,13	0,9/0,9	0,76/0,76	0,33/0,28	0,21/0,19
9	9,02/9,22	4,6/4,65	1,91/1,97	2,3/2,29	0,97/0,98	0,86/0,88	0,44/0,39	0,1/0,09
10	9,0/8,77	4,58/4,46	1,87/1,83	2,27/2,3	0,96/0,95	0,85/0,84	0,39/0,41	0,1/0,13
11	8,86/8,55	4,5/4,36	1,89/1,83	2,15/2,09	0,95/0,94	0,83/0,82	0,31/0,31	0,12/0,11
12	9,26/9,29	4,8/4,83	1,94/1,98	2,21/2,24	0,99/0,99	0,89/0,91	0,35/0,38	0,09/0,8
13	9,01/9,03	4,59/4,6	1,88/1,9	2,27/2,24	0,97/0,96	0,86/0,85	0,39/0,39	0,13/0,11
14	9,1/9,21	4,7/4,71	1,92/1,94	2,4/2,47	0,97/0,96	0,87/0,85	0,57/0,59	0,08/0,08
15	9,18/9,19	4,75/4,8	1,9/1,95	2,11/2,09	0,98/0,98	0,88/0,88	0,28/0,27	0,11/0,1

В числителе – экспериментальные данные, в знаменателе - вычисленные

Адекватность полученных математических моделей оценивали по критерию Фишера, множественному коэффициенту корреляции, коэффициенту множественной детерминации. Значимость коэффициентов уравнений регрессии – по критерию Стьюдента. Остаточную дисперсию рассчитывали по формуле

$$S_{ocm}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{n - p - 1} \quad (3.12)$$

Дисперсию среднего рассчитывали по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (3.13)$$

Критерий Фишера вычисляли по формуле

$$F = \frac{S_{ocm}^2}{S_y^2} . \quad (3.14)$$

Значения дисперсий, критерий Фишера, множественный коэффициент корреляции и коэффициент множественной детерминации для ЦМА-10 и ЦМА-15 представлены в таблицах 3.20, 3.21 соответственно.

Таблица 3.20 – Значения дисперсий, критерий Фишера (F), множественный коэффициент корреляции (R) и коэффициент множественной детерминации (R^2)

Вид модели	Дисперсия среднего	Остаточная дисперсия	F -критерий	R	R^2
$y_1 (R_0, \text{МПа})$	0,341767	0,057690	5,924	0,956	0,914
$y_2 (R_{20}, \text{МПа})$	0,227242	0,030434	7,466	0,964	0,930
$y_3 (R_{50}, \text{МПа})$	0,027811	0,00326	8,531	0,968	0,938
$y_4 (W, \%)$	0,060792	0,011093	5,48	0,952	0,908
$y_5 (k_8)$	0,001026	0,000245	41,89	0,993	0,986
$y_6 (k_{60})$	0,002022	0,000354	5,7	0,954	0,911
$y_7 (H, \%)$	0,027733	0,001897	14,61	0,981	0,963
$y_8 (B, \%)$	0,004009	0,000538	7,44	0,964	0,93

Таблица 3.21 – Значения дисперсий, критерий Фишера (F), множественный коэффициент корреляции (R) и коэффициент множественной детерминации (R^2)

Вид модели	Дисперсия среднего	Остаточная дисперсия	F -критерий	R	R^2
$y_1 (R_0, \text{МПа})$	0,618372	0,105884	5,84	0,955	0,913
$y_2 (R_{20}, \text{МПа})$	0,190441	0,030792	6,18	0,957	0,917
$y_3 (R_{50}, \text{МПа})$	0,026616	0,005349	4,975	0,948	0,899
$y_4 (W, \%)$	0,053664	0,006412	8,36	0,968	0,937
$y_5 (k_e)$	0,001255	0,000172	7,27	0,963	0,927
$y_6 (k_{e0})$	0,002291	0,000322	7,09	0,963	0,927
$y_7 (H, \%)$	0,029397	0,003223	9,11	0,97	0,942
$y_8 (B, \%)$	0,003744	0,000646	5,78	0,95	0,91

Рассчитанные значения множественного коэффициента корреляции R , коэффициента множественной детерминации R^2 достаточно высоки и близки к единице, что говорит о высоком качестве полученных моделей.

Для полученных моделей $F_{\text{крит}} = 4,772$. Таким образом, согласно данным представленным в таблицах 3.20-3.21, по критерию Фишера математические модели являются статистически значимыми, так как во всех случаях $F_{\text{табл}} > F_{\text{крит}}$.

Зависимости исследуемых свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонов от трех принятых независимых факторов описывается следующими уравнениями регрессии.

Для ЩМА-10:

1) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 0 °С:

$$y_1 = 8,7451 + 0,253x_1 + 0,178x_2 + 0,12x_3 - 0,02875x_1x_2 - 0,01125x_1x_3 - 0,00375x_2x_3 - 0,3338x_1^2 - 0,3338x_2^2 - 0,3188x_3^2$$

2) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 20 °С:

$$y_2 = 4,6651 + 0,196x_1 + 0,154x_2 + 0,093x_3 - 0,04125x_1x_2 - 0,01625x_1x_3 - 0,02125x_2x_3 - 0,2588x_1^2 - 0,2788x_2^2 - 0,2738x_3^2$$

3) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 50 °С:

$$y_3 = 1,8666 + 0,092x_1 + 0,066x_2 + 0,025x_3 - 0,015x_1x_2 - 0,0025x_1x_3 - 0,0075x_2x_3 - 0,0833x_1^2 - 0,1033x_2^2 - 0,0483x_3^2$$

4) Водонасыщение асфальтобетона:

$$y_4 = 2,2477 + 0,193x_1 - 0,081x_2 - 0,037x_3 + 0,02375x_1x_2 + 0,04125x_1x_3 + 0,03875x_2x_3 - 0,03722x_1^2 - 0,1172x_2^2 - 0,0072x_3^2$$

5) Водостойкость асфальтобетона:

$$y_5 = 0,974 + 0,009x_1 + 0,01x_2 + 0,003x_3 + 0,00125x_1x_2 - 0,00125x_1x_3 + 0,00125x_2x_3 - 0,025x_1^2 - 0,02x_2^2 - 0,015x_3^2$$

6) Водостойкость асфальтобетона при длительном водонасыщении:

$$y_6 = 0,8668 + 0,019x_1 + 0,018x_2 + 0,012x_3 - 0,00125x_1x_2 - 0,00375x_1x_3 + 0,00125x_2x_3 - 0,0261x_1^2 - 0,0311x_2^2 - 0,0111x_3^2$$

7) Набухание асфальтобетона:

$$y_7 = 0,3584 + 0,13x_1 - 0,068x_2 - 0,006x_3 - 0,045x_1x_2 - 0,0025x_1x_3 - 0,005x_2x_3 + 0,0744x_1^2 - 0,0555x_2^2 - 0,0055x_3^2$$

8) Стекаемость вяжущего:

$$y_8 = 0,0868 - 0,026x_1 + 0,014x_2 + 0,022x_3 + 0,0175x_1x_2 + 0,01x_1x_3 - 0,0075x_2x_3 + 0,0288x_1^2 + 0,0288x_2^2 + 0,0388x_3^2$$

Для ЩМА-15:

1) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 0 °С:

$$y_1 = 9,4213 + 0,327x_1 + 0,167x_2 + 0,13x_3 + 0,08125x_1x_2 + 0,09875x_1x_3 - 0,13625x_2x_3 - 0,54166x_1^2 - 0,3016x_2^2 - 0,5166x_3^2$$

2) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 20 °С:

$$y_2 = 4,8466 + 0,175x_1 + 0,086x_2 + 0,68x_3 + 0,04125x_1x_2 + 0,05125x_1x_3 - 0,06875x_2x_3 - 0,30833x_1^2 - 0,1333x_2^2 - 0,3233x_3^2$$

3) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 50 °С:

$$y_3 = 1,9784 + 0,057x_1 + 0,054x_2 + 0,023x_3 - 0,0275x_1x_2 - 0,0025x_1x_3 - 0,0025x_2x_3 - 0,09055x_1^2 - 0,0755x_2^2 - 0,1205x_3^2$$

4) Водонасыщение асфальтобетона:

$$y_4 = 2,2786 + 0,191x_1 - 0,074x_2 - 0,034x_3 - 0,0125x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,0025x_2x_3 + 0,00166x_1^2 - 0,1133x_2^2 - 0,0033x_3^2$$

5) Водостойкость асфальтобетона:

$$y_5 = 0,9873 + 0,011x_1 + 0,008x_2 + 0,004x_3 + 0,00125x_1x_2 + 0,00375x_1x_3 - 0,00125x_2x_3 - 0,03166x_1^2 - 0,0066x_2^2 - 0,0266x_3^2$$

6) Водостойкость асфальтобетона при длительном водонасыщении:

$$y_6 = 0,8857 + 0,016x_1 + 0,011x_2 + 0,005x_3 - 0,0025x_1x_2 + 0,0025x_1x_3 - 0,0025x_2x_3 - 0,04222x_1^2 - 0,0072x_2^2 - 0,03722x_3^2$$

7) Набухание асфальтобетона:

$$y_7 = 0,38844 + 0,14x_1 - 0,061x_2 - 0,016x_3 - 0,035x_1x_2 - 0,0125x_1x_3 - 0,0125x_2x_3 + 0,06444x_1^2 - 0,06055x_2^2 + 0,0144x_3^2$$

8) Стекаемость вяжущего:

$$y_8 = 0,0777 - 0,024x_1 + 0,014x_2 + 0,017x_3 + 0,0175x_1x_2 + 0,01x_1x_3 - 0,005x_2x_3 + 0,02777x_1^2 + 0,0277x_2^2 + 0,04277x_3^2$$

Переходя к физическим величинам, получены следующие зависимости.

Для ЩМА-10:

1) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 0 °С:

$$R_0 = 8,7451 + 0,253C_k + 0,178C - 0,3338C_k^2 - 0,3338C^2$$

2) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 20 °С:

$$R_{20} = 4,6651 + 0,196C_k + 0,154C - 0,2588C_k^2 - 0,2788C^2 - 0,2738T_{\Pi}^2$$

3) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 50 °С:

$$R_{50} = 1,8666 + 0,092C_k + 0,066C - 0,833C_k^2 - 0,1033C^2$$

4) Водонасыщение асфальтобетона:

$$W = 2,2477 + 0,193C_k - 0,081C$$

5) Водостойкость асфальтобетона:

$$k_g = 0,974 + 0,009C_k + 0,01C - 0,025C_k^2 - 0,02C^2 - 0,015T_{\Pi}^2$$

6) Водостойкость асфальтобетона при длительном водонасыщении:

$$k_{вд} = 0,8668 + 0,019C_k + 0,018C - 0,0261C_k^2 - 0,0311C^2$$

7) Набухание асфальтобетона:

$$H = 0,3584 + 0,13C_k - 0,068C + 0,0744C_k^2$$

8) Стекаемость вяжущего:

$$B = 0,0868 - 0,026C_k + 0,022T_{п} + 0,015T_{п}^2$$

Для ЩМА-15:

1) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 0 °С:

$$R_0 = 9,4213 + 0,327C_k - 0,54166C_k^2 - 0,5166T_{п}^2$$

2) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 20 °С:

$$R_{20} = 4,8466 + 0,175C_k - 0,30833C_k^2 - 0,3233T_{п}^2$$

3) Предел прочности при сжатии асфальтобетона при 50 °С:

$$R_{50} = 1,9784 + 0,057C_k + 0,054C - 0,1205T_{п}^2$$

4) Водонасыщение асфальтобетона:

$$W = 2,2786 + 0,191C_k - 0,074C - 0,1133C^2$$

5) Водостойкость асфальтобетона:

$$k_{в} = 0,9873 + 0,011C_k + 0,03166C_k^2 - 0,0266T_{п}^2$$

6) Водостойкость асфальтобетона при длительном водонасыщении:

$$k_{вд} = 0,8857 + 0,016C_k + 0,04222C_k^2 - 0,03722T_{п}^2$$

7) Набухание асфальтобетона:

$$H = 0,38844 + 0,14C_k - 0,061C$$

8) Стекаемость вяжущего:

$$B = 0,0777 - 0,024C_k + 0,04277T_{п}^2$$

В результате проведенных исследований были установлены зависимости функций отклика от принятых факторов.

Наибольшие значения прочности при сжатии при 0, 20, 50 °С, водостойкости, водостойкости при длительном водонасыщении установлены при следующих значениях принятых факторов.

Для ЩМА-10:

– содержание керамзитового порошка 2,5 %, содержание битума 6,5 %, температура приготовления смеси 165 °С.

Для ЩМА-15:

– содержание керамзитового порошка 2,5 %, содержание битума 6,0 %, температура приготовления смеси 165 °С.

Показатели водонасыщения и набухания асфальтобетона при указанном содержании керамзитового порошка, битума и принятой температуры приготовления минимальны и полностью удовлетворяют нормативным требованиям как в случае с ЩМА-10, так и с ЩМА-15.

Показатели стекания вяжущего ЩМА-10 и ЩМА-15 составили 0,11 % и 0,09 % соответственно. Увеличение в смеси количества керамзитового порошка приводит к снижению показателя стекания вяжущего и снижению прочностных показателей, повышению водонасыщения и набухания. При снижении количества керамзитового порошка в смеси повышается показатель стекания вяжущего, снижается прочность, водонасыщение и набухание. Таким образом, согласно математическому планированию эксперимента, содержание керамзитового порошка, при котором обеспечены оптимальные показатели исследуемых свойств ЩМА, принято в пределах $2,5 \pm 0,03$ % сверх массы минерального материала.

3.7 Влияние содержания керамзитового порошка на свойства ЩМА

3.7.1 Влияние содержания керамзитового порошка на плотность ЩМА

Важнейшим показателем структуры асфальтобетона является плотность. Плотность во многом определяет физико-механические и структурно-механические свойства асфальтобетона. Согласно графикам зависимостей плотности $\rho - C_k$ при повышении содержания керамзитового порошка в смеси плотность ЩМА незначительно понижается (рис. 3.11). Плотность ЩМА-15 выше плотности ЩМА-10, что связано со структурой материала.

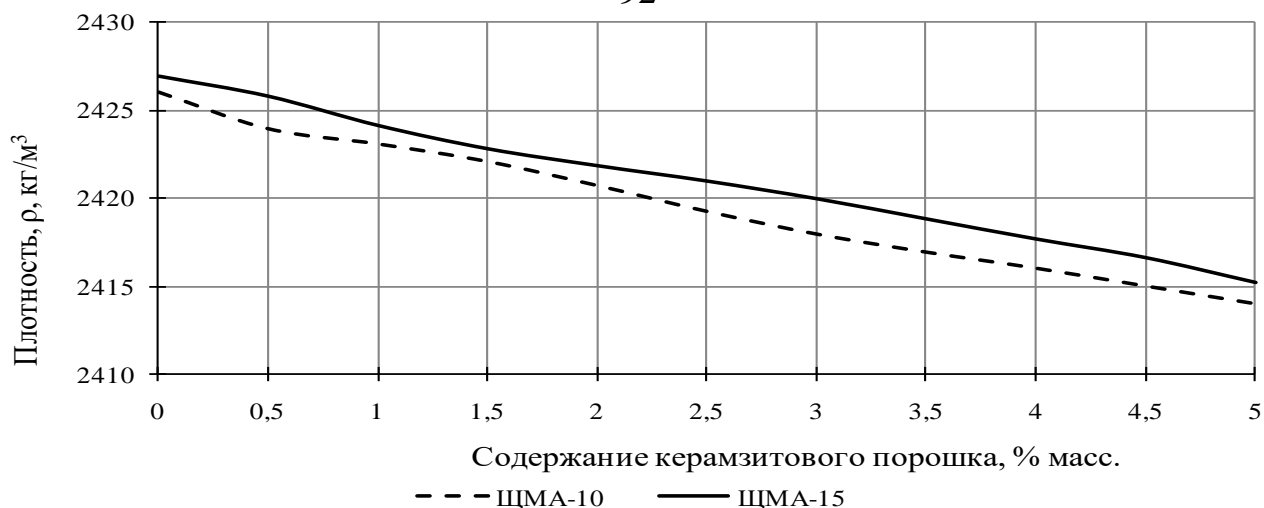


Рисунок 3.11 – Зависимость плотности ρ от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума для ЩМА различных марок

3.7.2 Влияние содержания керамзитового порошка на прочностные характеристики ЩМА

Зависимости показателей прочности щебеночно-мастичных асфальтобетонов при сжатии от содержания керамзитового порошка при температурах 0, 20 и 50 °С (R_0 , R_{20} , R_{50}) имеют экстремальный характер (рис. 3.12-3.14). Максимальным значениям пределов прочности как ЩМА-10, так и ЩМА-15, соответствует оптимальное содержание керамзитового порошка (C_k), равное 2,5 % масс. Наиболее высокие показатели прочности при сжатии при 0, 20 и 50 °С зафиксированы у образцов ЩМА-15.

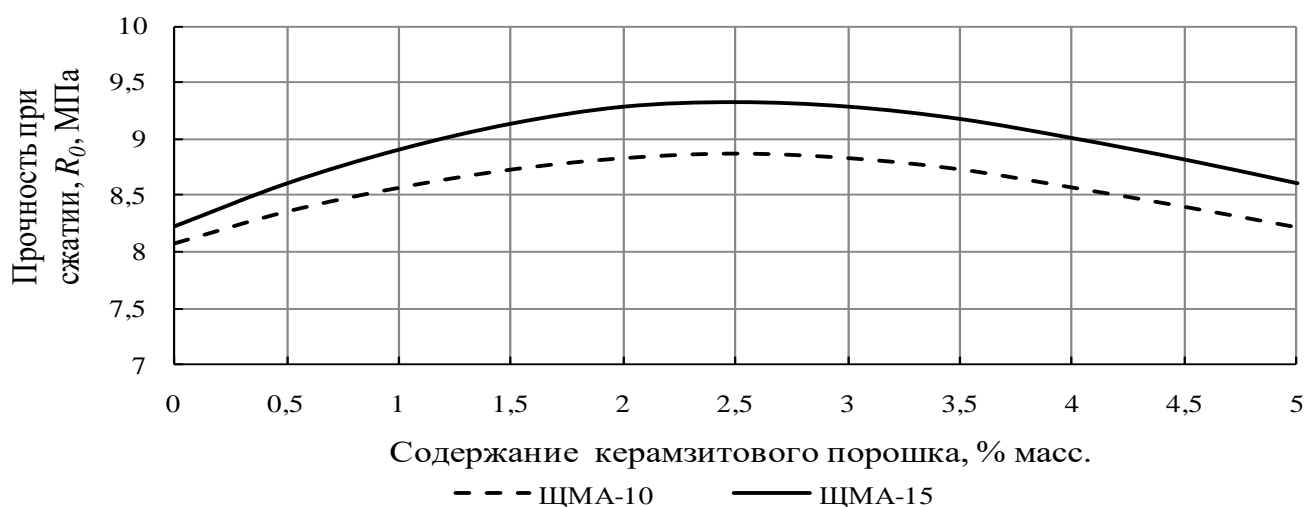


Рисунок 3.12 – Зависимость прочности при сжатии R_0 от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума для ЩМА различных марок

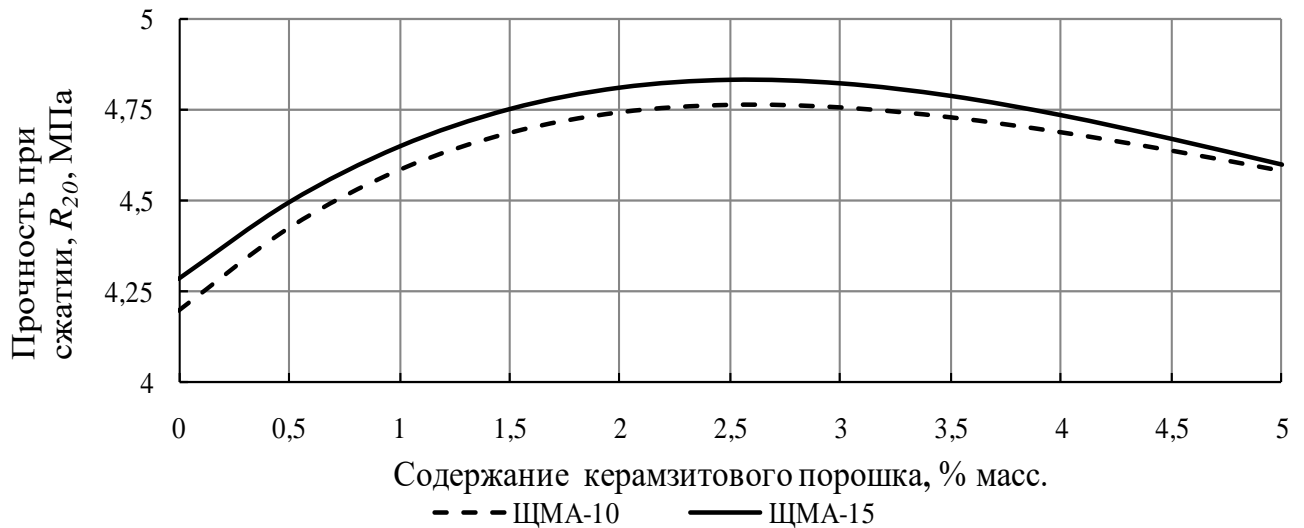


Рисунок 3.13 – Зависимость прочности при сжатии R_{20} от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума для ЩМА различных марок

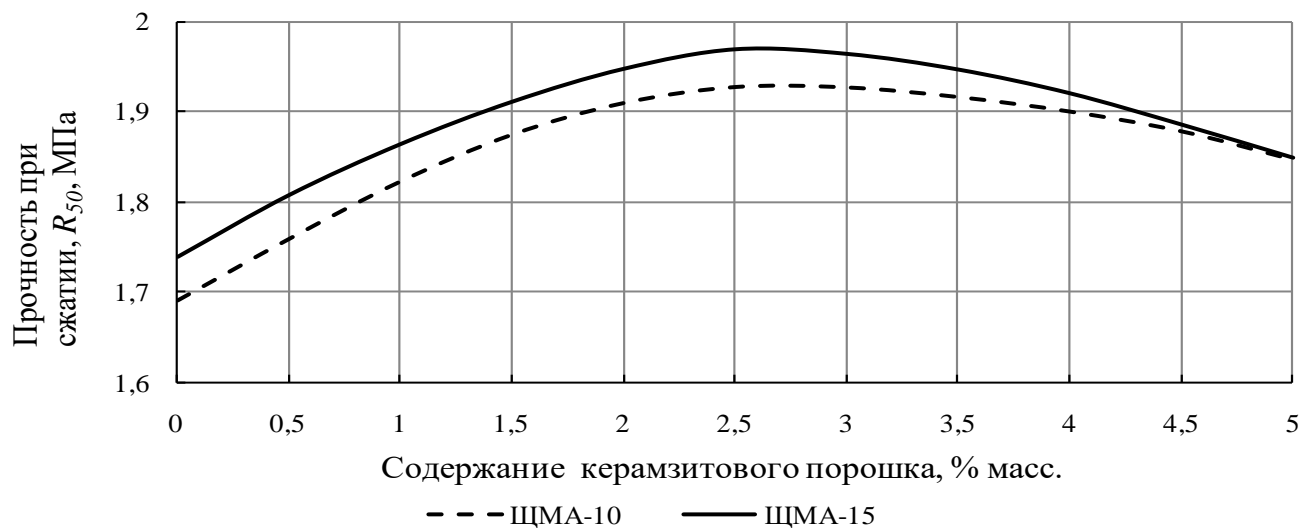


Рисунок 3.14 – Зависимость прочности при сжатии R_{50} от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума для ЩМА различных марок

3.7.3 Влияние содержания керамзитового порошка на водостойкость ЩМА

Зависимости водонасыщения W и набухания H от содержания керамзитового порошка в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях представлены на рисунках 3.15 и 3.16. С увеличением содержания керамзитового порошка C_k в смеси показатели водонасыщения и набухания повышаются.

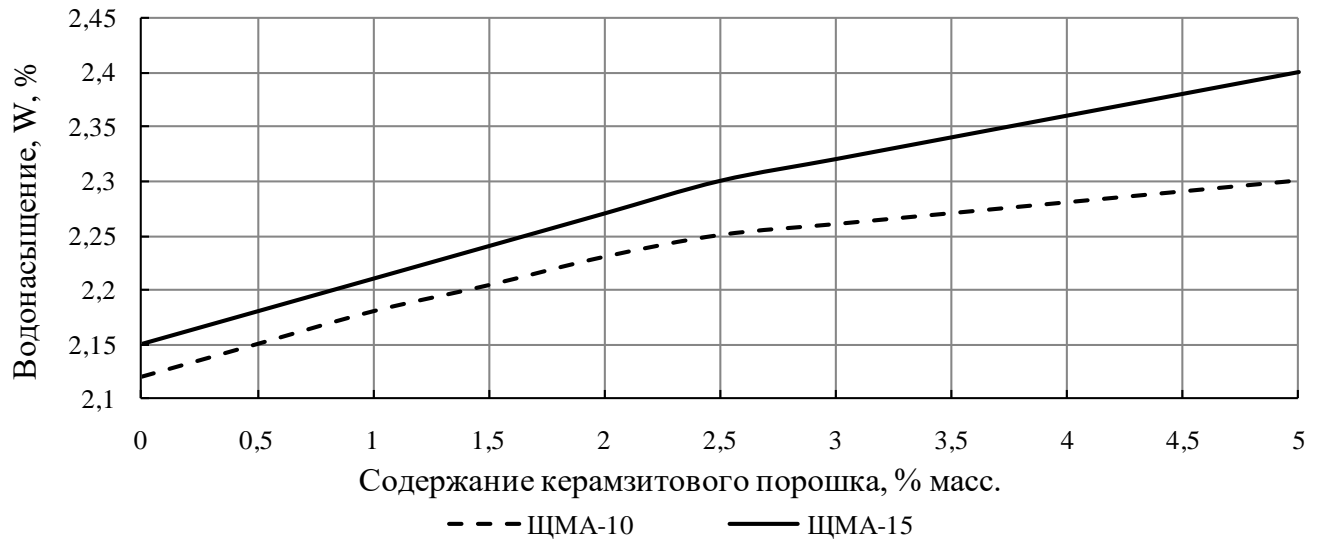


Рисунок 3.15 – Зависимость изменения водонасыщения (W) от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума для ЦМА различных марок

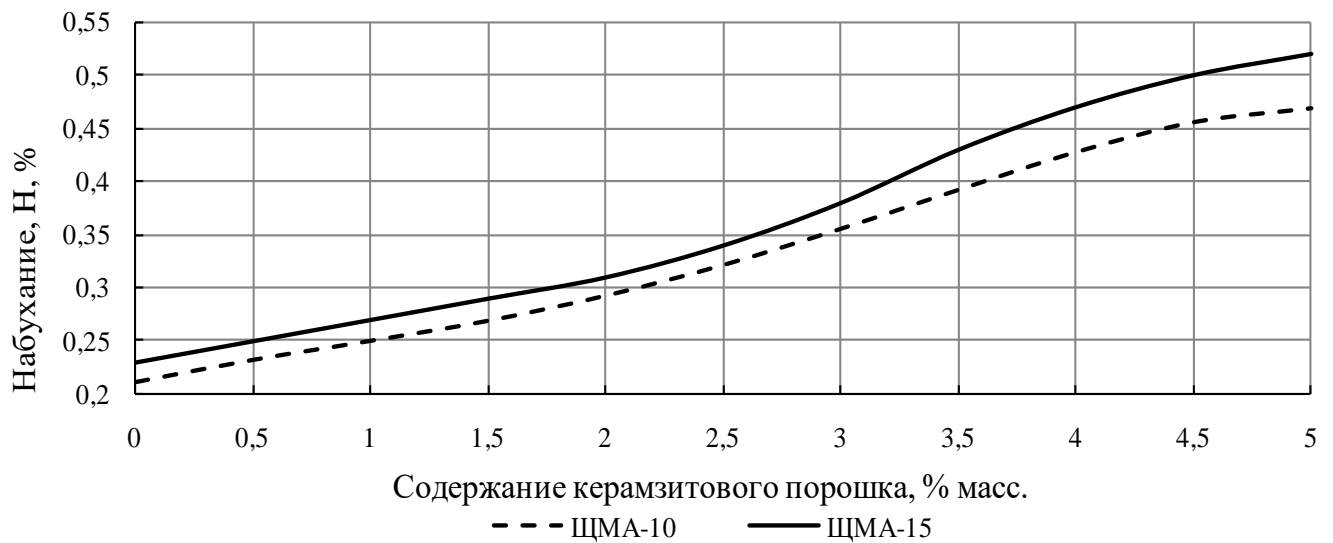


Рисунок 3.16 – Зависимость изменения набухания (H) от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума для ЦМА различных марок

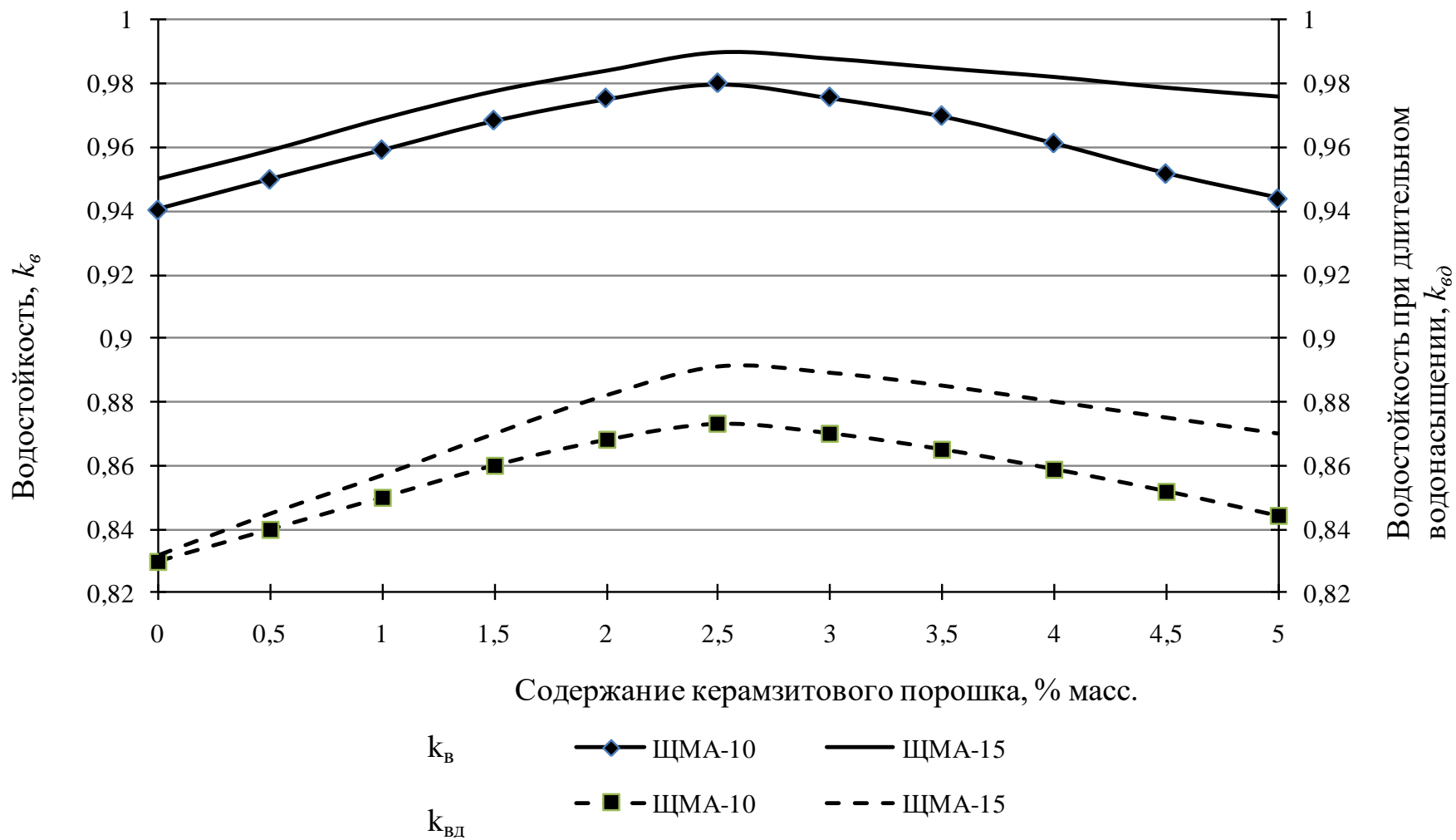


Рисунок 3.17 – Зависимость изменения водостойкости k_g и водостойкости при длительном водонасыщении $k_{гд}$ ЩМА от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума

Зависимости водостойкости k_g и водостойкости при длительном водонасыщении $k_{гд}$ от содержания керамзитового порошка имеют экстремальный характер (рисунок 3.17). Максимальным значениям k_g и $k_{гд}$ соответствует оптимальное содержание керамзитового порошка 2,5 %. Наиболее высокие показатели k_g и $k_{гд}$ зафиксированы у ЩМА-15 и равны 0,99 и 0,89 соответственно.

3.7.4 Влияние содержания керамзитового порошка на сегрегацию ЩМАС

Значения показателей стекаемости (B) щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с увеличением C_k устойчиво снижаются (рисунок 3.18). Наиболее низкие значения стекаемости зафиксированы у ЩМА-15 при содержании высокодисперсных отсеков дробления керамзита C_k равном 5 %. Оптимальному содержанию C_k (2,5 %) соответствуют следующие значения показателя стекаемости: для ЩМА-10 – 0,11 %; для ЩМА-15 – 0,105 %, которое полностью соответствует требованиям ГОСТ 31015-2002.

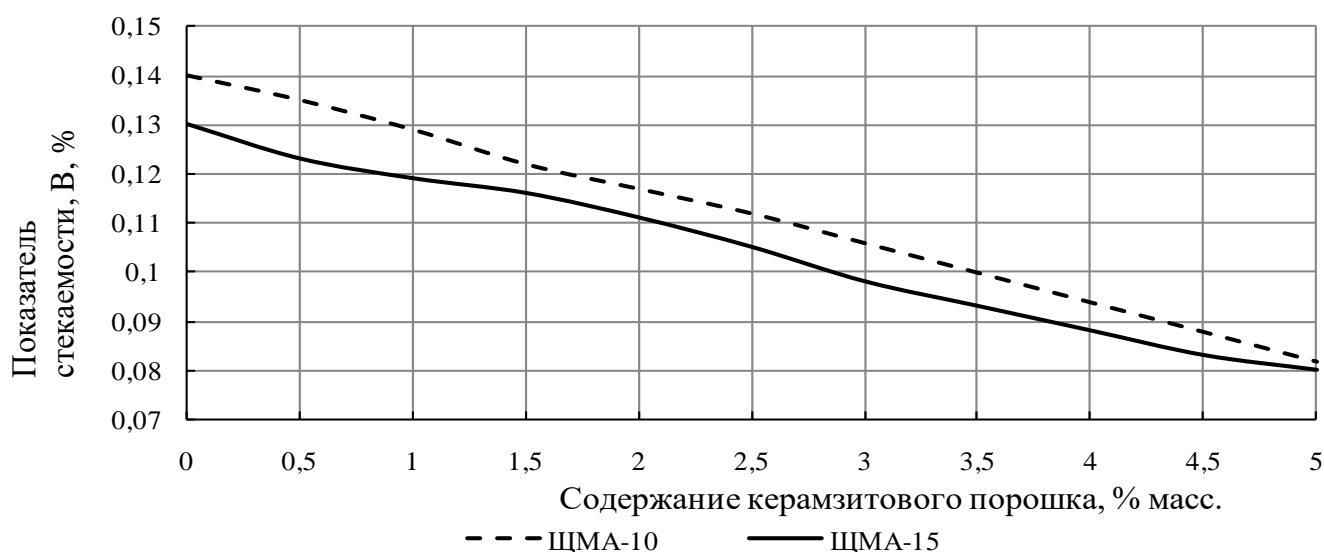


Рисунок 3.18 – Зависимость изменения показателя стекаемости ЩМАС от содержания керамзитового порошка C_k при оптимальном содержании битума

Экспериментальные исследования применения керамзитового порошка C_k в составах ЩМА выявили его положительное влияние на физико-механические и технологические свойства.

3.8 Исследование реологических параметров ЩМА

Реологические параметры определяли для ЩМА-10 и ЩМА-15 путем испытания образцов-цилиндров диаметром и высотой $71,5 \pm 1,5$ мм при различных температурах по методике Я.Н. Ковалева [12]. Определяли следующие реологические параметры: коэффициент вязкости η_m , коэффициент вязкой податливости γ , время релаксации θ , время ретардации τ , кинетические характеристики P_1 , P_2 и P_1/P_2 , модуль упругости E . Результаты испытаний приведены в таблицах 3.23 и 3.24.

Кинетические характеристики P_1 , P_2 и P_1/P_2 характеризуют скорость развития деформаций [12]. Величина P_1/P_2 является отношением времени ретардации τ ко времени релаксации θ и дает качественную оценку процесса деформации, происходящего в асфальтобетонном покрытии. Согласно [12], данное отношение характеризует качество асфальтобетона со стороны его способности к сопротивлению воздействию факторам при одновременном сохранении сплошности в покрытии.

По мнению [12], значение параметра P_1/P_2 характеризует жесткость асфальтобетона. При минимальном значении отношения P_1/P_2 жесткость максимальна и, наоборот, при максимальном – P_1/P_2 жесткость минимальна [12]. Как известно жесткость асфальтобетонных покрытий в зимнее время значительно превосходит жесткость при высоких летних температурах. Для обеспечения лучшей трещиностойкости в зимний период необходимо, чтобы жесткость асфальтобетона была минимальна, следовательно отношение P_1/P_2 должно быть максимальным, применительно к данной температуре. Для обеспечения высокой сдвигоустойчивости в летнее время года необходимо, чтобы P_1/P_2 принимало как можно более низкие значения применительно к данной температуре [12].

Исследовали зависимости реологических характеристик при эксплуатационных температурах в пределах от -10 до $+60$ °С. Температура $+60$ °С была выбрана в связи с тем, что в южных регионах нашей страны, согласно натурным наблюдениям, температура дорожного покрытия может достигать

данной величины в жаркие летние периоды и способна держаться до нескольких часов в день, а $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – соответствует работе асфальтобетона в зимнее время, как практически упругого тела. Спектр рассматриваемых температур моделировал работу асфальтобетона в упругой, упруго-вязкой, вязко-пластичной и пластической стадиях.

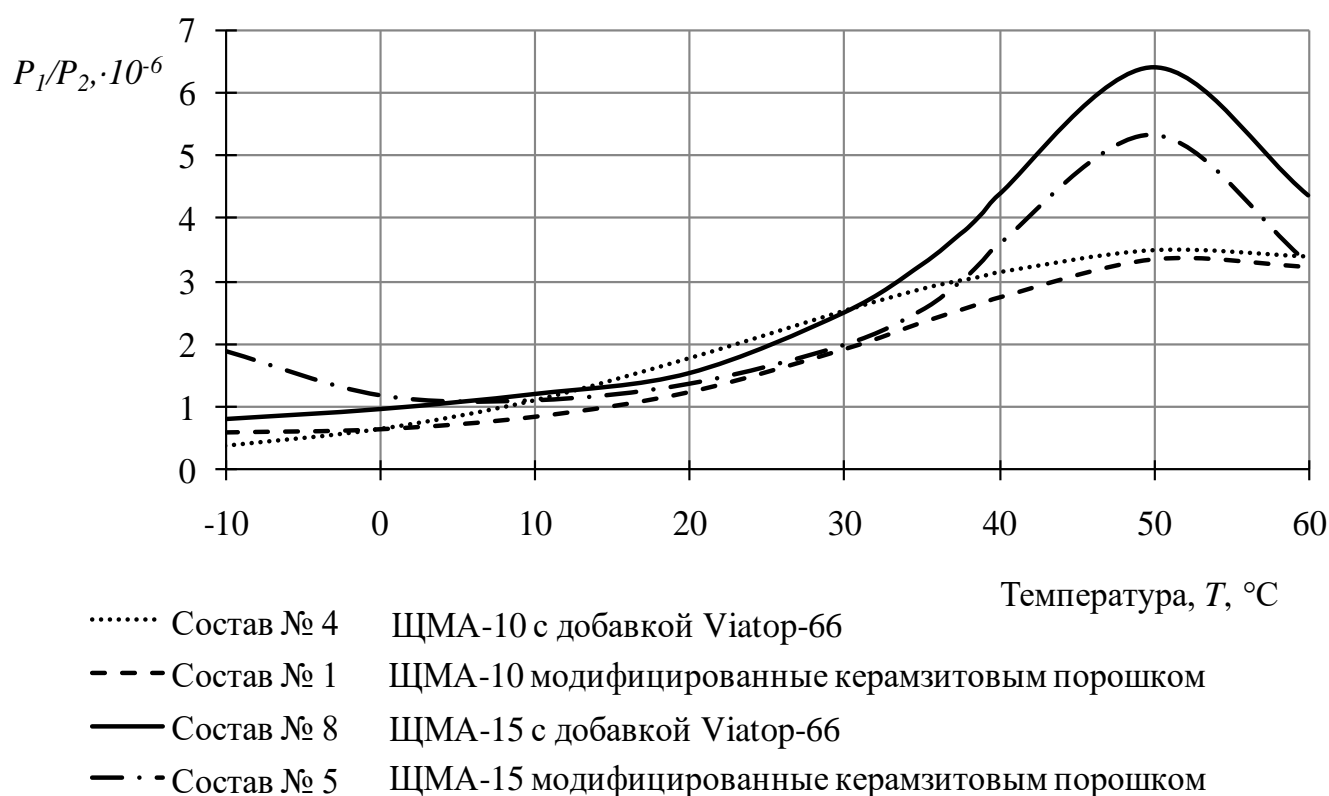


Рисунок 3.19 – Зависимость изменения отношения P_1/P_2 от температуры T

Полученные результаты для ЩМА обоих марок (ЩМА-10 и ЩМА-15) представлены в таблицах 3.22, 3.23 и на рисунках 3.19-3.21. Необходимо отметить следующее: при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ для ЩМА-10 и ЩМА-15 отношение P_1/P_2 выше в составах с содержанием керамзитового порошка, что говорит о меньшей жесткости покрытия и о снижении вероятности образования трещин; при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ отношение P_1/P_2 выше для ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, а для ЩМА-10 отношение P_1/P_2 выше с добавкой Viator. При положительных эксплуатационных температурах 20, 35, 50 и $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в обоих случаях значение P_1/P_2 ниже для ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.

Таблица 3.22 – Реологические параметры ЩМА-10

№ состава	$T, ^\circ\text{C}$	$\eta_{\text{м}}, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{см}^2 \cdot 10^6$	$\gamma, \text{см}^2 \cdot \text{с}/\text{Н}$	$\theta, \text{с}$	$\tau, \text{с}$	$P_1, 10^{-6}$	$P_2, 10^{-3}$	$P_1/P_2, 10^{-3}$	$E, \text{МПа}$
Состав № 4	-10	332,77	0,00093	10353,48	20,27	-48,57	-13,56	0,49	317,42
Состав № 1		326,36	0,00091	10294,35	20,92	-48,29	-13,13	0,51	321
Состав № 4	0	141,36	0,0021	8047,41	25,82	-62,13	-10,66	0,78	175,66
Состав № 1		175,44	0,002	9626,22	25,1	-51,94	-10,94	0,67	182,25
Состав № 4	20	41,77	0,0068	5494,58	36,29	-90,99	-7,56	1,64	76,03
Состав № 1		55,71	0,0059	6806,97	33,52	-73,45	-8,23	1,22	81,86
Состав № 4	35	17,89	0,012	4078,9	44,76	-146,14	-6,14	3,24	52,3
Состав № 1		24,5	0,0095	4421,39	39,78	-122,58	-6,91	2,41	60,1
Состав № 4	50	9,11	0,026	3489,14	47,98	-143,3	-5,72	3,41	26,1
Состав № 1		10,21	0,025	3646,26	49,44	-137,12	-5,55	3,36	28,0
Состав № 4	60	7,38	0,038	3880,3	31	-128,86	-5,38	3,27	19,02
Состав № 1		8,24	0,034	3882,98	28,57	-128,77	-5,4	3,25	21,23

Состав № 4 – ЩМА-10 с добавкой Viator-66

Состав № 1 – ЩМА-10 с добавкой керамзитового порошка

Таблица 3.23 – Реологические параметры ЩМА-15

№ состава	$T, ^\circ\text{C}$	$\eta_{\text{м}}, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{см}^2 \cdot 10^6$	$\gamma, \text{см}^2 \cdot \text{с}/\text{Н}$	$\theta, \text{с}$	$\tau, \text{с}$	$P_1, 10^{-6}$	$P_2, 10^{-3}$	$P_1/P_2, 10^{-3}$	$E, \text{МПа}$
Состав № 8 Состав № 5	-10	183,87 145,53	0,001 0,0009	9511,94 3543,75	21,2 28,57	-52,57 -61,09	-12,98 -9,7	0,55 1,9	298,43 310,67
Состав № 8 Состав № 5	0	134,85 126,82	0,0018 0,0016	6299,77 5605,6	24,53 27,97	-79,37 -89,2	-11,25 -9,86	0,97 1,24	214,06 226,25
Состав № 8 Состав № 5	20	37,37 47,67	0,0077 0,0074	5766,35 6769,23	35,56 36,36	-86,71 -73,86	-7,79 -7,62	1,53 1,33	64,8 70,42
Состав № 8 Состав № 5	35	14,24 22,07	0,015 0,011	3473,89 4481,28	40,54 38,22	-143,93 -111,58	-6,78 -7,22	2,9 2,11	40,99 49,25
Состав № 8 Состав № 5	50	5,0 6,18	0,045 0,044	2491,4 2985,7	62,9 64,34	-200,69 -167,46	-4,38 -4,29	6,26 5,34	20,0 20,7
Состав № 8 Состав № 5	60	4,72 5,45	0,051 0,036	2820,0 3558,7	47,18 49,65	-177,3 -140,5	-5,56 -5,83	4,37 3,3	13,26 19,33

Состав № 8 – ЩМА-15 с добавкой Viatop-66

Состав № 5 – ЩМА-15 с добавкой керамзитового порошка

Следовательно, предложенные ЩМА обладают большей жесткостью и являются более сдвигоустойчивыми при высоких температурах. Зависимости изменения отношения P_1/P_2 от температуры представлены на рисунке 3.19. С повышением температуры коэффициент вязкости η_m снижается (таблицы 3.22 и 3.23), однако вязкость ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком, выше, чем ЩМА с добавкой Viator.

Согласно [12], повышение сдвигоустойчивости возможно достигнуть различными способами: использованием более вязкого битума, применением полимербитумных вяжущих; повышением содержания и максимального размера щебня; уменьшением содержания битума; заменой природного песка на дробленый; применением активированного минерального порошка.

В предложенных ЩМА, повышение сдвигоустойчивости возможно обеспечить за счет увеличения вязкости битума в результате взаимодействия вяжущего с керамзитовым порошком. Зависимости модулей упругости E исследуемых ЩМА от температуры представлены на рисунках 3.20, 3.21. Для обоих марок (ЩМА-10 и ЩМА-15) значения модулей упругости составов с применением керамзитового порошка выше, чем у составов с добавкой Viator-66.

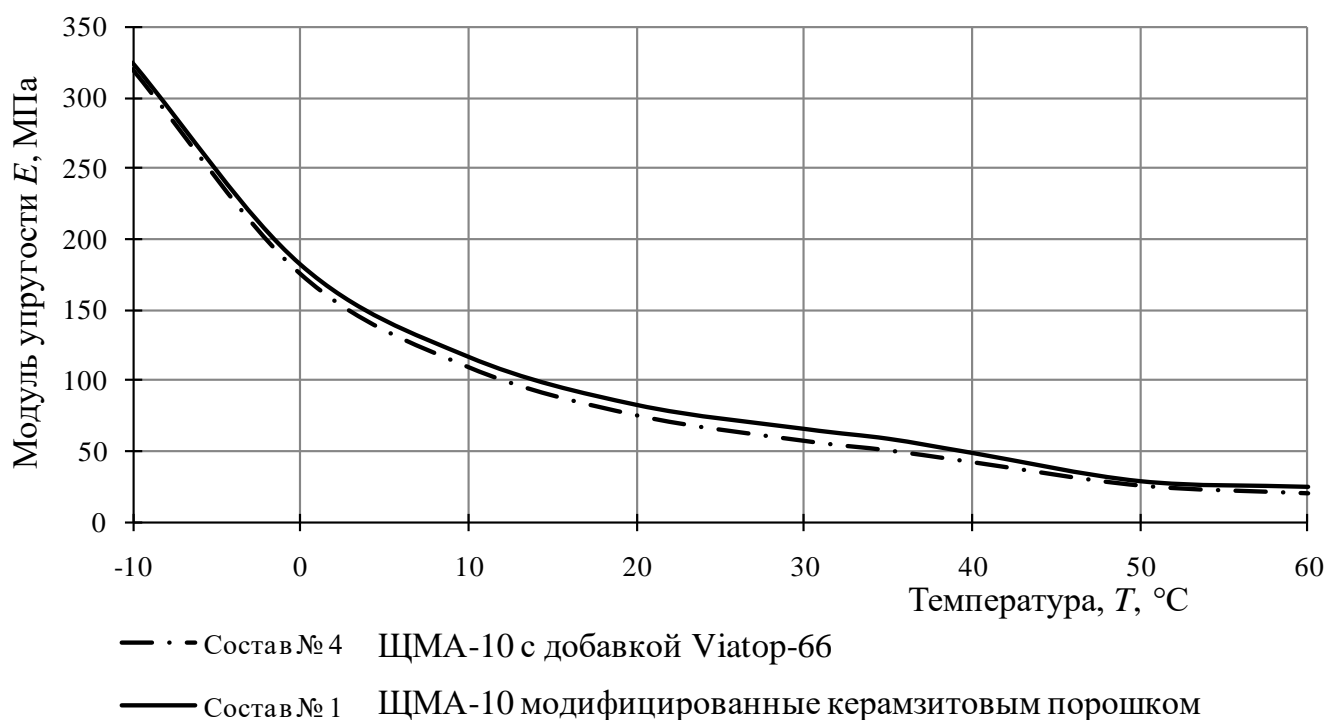


Рисунок 3.20 – Зависимости модуля упругости E от температуры исследуемых ЩМА

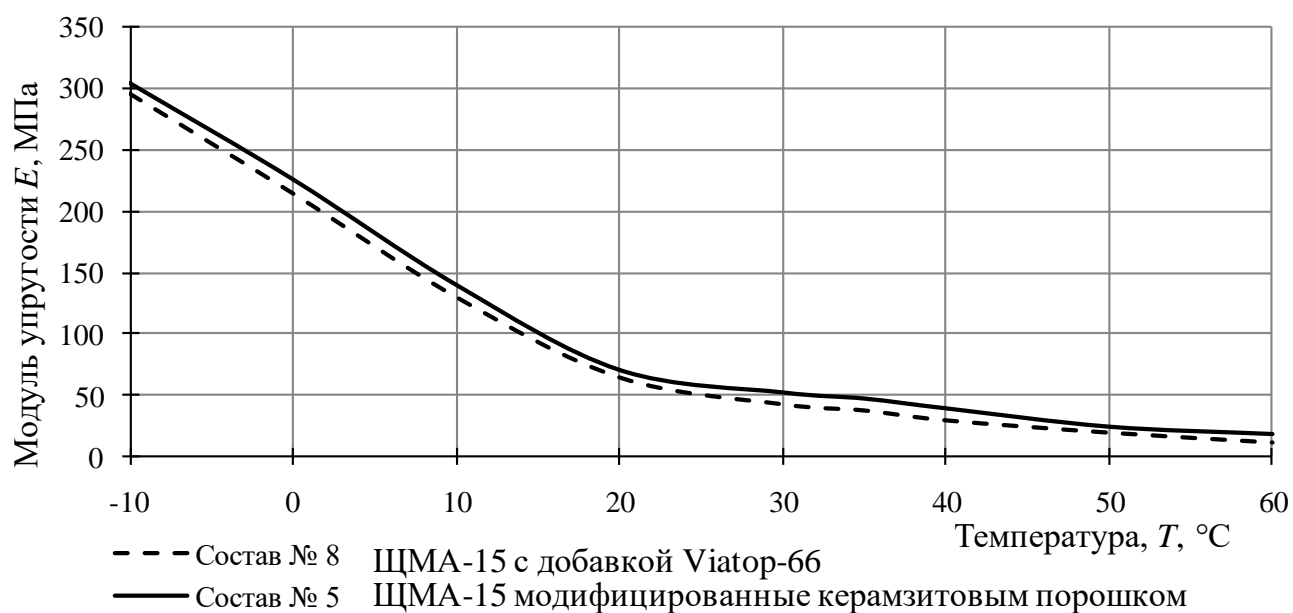


Рисунок 3.21 – Зависимости модуля упругости E от температуры исследуемых ЩМА

3.9 Исследование эксплуатационных свойств ЩМА

3.9.1 Исследование сдвигоустойчивости ЩМА

Определение показателей сдвигоустойчивости образцов из ЩМА проводили при одноосном сжатии и сжатии по схеме Маршала. Для оценки сдвигоустойчивости определяли коэффициент внутреннего трения ($tg\varphi$) и сцепление при сдвиге при температуре 50 °C (C_π). Полученные результаты для составов ЩМА с оптимальным содержанием керамзитового порошка представлены в таблице 3.24.

Согласно исследованиям выявлено, что наиболее высокие показатели коэффициента внутреннего трения ($tg\varphi$), сцепления при сдвиге (C_π) и угла внутреннего трения (φ) зафиксированы у образцов ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком. Повышенная сдвигоустойчивость данного состава ЩМА обуславливается следующим: высоким содержанием крупного щебня и более высокой вязкостью модифицированного керамзитовым порошком битума. Основное влияние на показатели сдвигоустойчивости оказывает зерновой состав смеси. Щебеночно-мастичные асфальтобетоны с оптимально подобранным зерновым составом и оптимальным содержанием битума являются более

сдвигоустойчивыми, чем асфальтобетоны типа А и Б, за счет низкой пластичности и жесткой каркасной структуры, что существенно повышает коэффициент внутреннего трения.

Таблица 3.24 – Показатели сдвигоустойчивости ЦМА-10 и ЦМА-15

Тип смеси	Коэффициент внутреннего трения, $tg\varphi$	Сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, C_n , МПа	Угол внутреннего трения, φ , °
ЦМА-10, модифицированные керамзитовым порошком	0,95	0,27	43°31'
ЦМА-10 со стабилизирующей добавкой Viatop-66	0,94	0,24	43°13'
ЦМА-15, модифицированные керамзитовым порошком	0,96	0,31	43°50'
ЦМА-15 со стабилизирующей добавкой Viatop-66	0,95	0,24	43°31'
Значение показателя согласно ГОСТ 31015-2002	$\geq 0,94$	$\geq 0,2$	-

Повышенный показатель сцепления при сдвиге у ЦМА, модифицированных керамзитовым порошком, в сравнении с ЦМА со стабилизирующей добавкой Viatop-66 обуславливается, во-первых – высокой степенью структурирования битума керамзитовым порошком за счет повышения вязкости битума в процессе избирательной фильтрации отдельных компонентов в микропоры частиц керамзита; во-вторых – частицы керамзита обладают очень развитой поверхностью и высокой шероховатостью, что оказывает положительное влияние на увеличение внутреннего трения и сцепления. В результате исследований выявлено, что применение керамзитового порошка ведет к повышению показателей сдвигоустойчивости ЦМА.

3.9.2 Исследование трещиностойкости ЦМА

Трещиностойкость щебеночно-мастичных асфальтобетонов оценивали по пределу прочности на растяжение при расколе R_p . Показатели трещиностойкости

определяли для ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, с оптимальным его содержанием в смеси. Для сравнения испытывали образцы ЩМА-10 и ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66 (ГОСТ 12801-98). Значения показателей R_p ЩМА приведены в таблице 3.25.

В результате исследований выявлено, что наиболее высокими показателями предела прочности на растяжение при расколе (R_p) обладают образцы ЩМА-15 и ЩМА-10, модифицированные керамзитовым порошком. Согласно [12], свойства асфальтобетонов при низких температурах в основном определяются свойствами битума и степенью структурирования битума минеральным наполнителем. Это подтверждается полученными результатами (таблица 3.25), согласно которым разница в показателях между ЩМА-10 и ЩМА-15 незначительна как для ЩМА с добавкой Viator-66, так и для ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.

Таблица 3.25 – Показатели предела прочности на растяжении при расколе исследуемых ЩМА

Тип смеси	Предел прочности на растяжение при расколе, R_p , МПа
ЩМА-10 со стабилизирующей добавкой на основе высокодисперсных отсеков дробления керамзита	6,13
ЩМА-10 со стабилизирующей добавкой Viator-66	5,78
ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой на основе высокодисперсных отсеков дробления керамзита	6,28
ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66	5,8
Значение показателя согласно ГОСТ 31015-2002, для IV и V климатических зон	3,0-6,5

3.9.3 Исследование морозостойкости ЩМА

Морозостойкость образцов ЩМА-10 и ЩМА-15 определяли по ГОСТ 12801-98. Испытывали образцы ЩМА, модифицированные керамзитовым

порошком, и со стабилизирующей добавкой Viatorp-66. Через каждые 25 циклов замораживания и оттаивания образцы испытывались на сжатие при температуре 20 °С. Полученные результаты приведены в таблице 3.26. Морозостойкость образцов ЦМА-10 и ЦМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, достаточно высокая и составила более 125 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Морозостойкость ЦМА со стабилизирующей добавкой Viatorp-66 для ЦМА-15 составила 125 циклов замораживания и оттаивания, для ЦМА-10 – 100 циклов. Значение коэффициента морозостойкости ($k_{мрз}$) предложенных ЦМА после 125 циклов замораживания и оттаивания выше, чем у ЦМА с добавкой Viatorp-66 как для ЦМА-10, так и для ЦМА-15.

Таблица 3.26 – Прочность образцов ЦМА при испытании на морозостойкость

Количество циклов замораживания и оттаивания	Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, R_{20} , МПа		Коэффициент морозостойкости, $k_{мрз}$	
ЩМА-10				
	керамзитовый порошок	Viatorp-66	керамзитовый порошок	Viatorp-66
0	4,75	4,2	-	-
25	4,7	4,11	0,98	0,97
50	4,6	4,02	0,96	0,95
75	4,33	3,79	0,91	0,9
100	3,89	3,36	0,81	0,8
125	3,56	2,8	0,75	0,66
150	3,1	2,44	0,65	0,58
ЩМА-15				
	керамзитовый порошок	Viatorp-66	керамзитовый порошок	Viatorp-66
0	4,8	4,3	-	-
25	4,76	4,26	0,99	0,99
50	4,64	4,08	0,96	0,94
75	4,4	3,81	0,92	0,88
100	3,98	3,52	0,82	0,81
125	3,68	3,01	0,76	0,7
150	3,25	2,54	0,67	0,59

3.9.4 Исследование износостойкости ЩМА

Одним из важнейших свойств асфальтобетонных покрытий является их устойчивость к преждевременному износу. Износ автомобильных дорог приводит к истиранию покрытия, снижению эксплуатационных качеств, преждевременного разрушения дорожного полотна, снижению сцепления покрытия дороги с колесом автомобиля.

Износостойкости разработанных ЩМА проводили путем оценки истираемости образцов ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, на приборе ЛКИ-3М. В качестве абразивного материала применяли смесь природного песка и дробленого песка. Общий путь, который проходил образец, составил 600 м. Согласно испытаниям потери массы образцов после истирания для ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком (в количестве 2,5 % масс.), составили $0,22 \text{ г/см}^2$ и $0,18 \text{ г/см}^2$ соответственно, а для стандартных ЩМА-10 и ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66 – $0,23 \text{ г/см}^2$ и $0,20 \text{ г/см}^2$ соответственно.

В результате испытаний установлена высокая истираемость и следовательно износостойкость образцов ЩМА, и выявлено, что применение в составах ЩМАС керамзитового порошка не оказывает существенного влияния на износостойкость ЩМА.

3.9.4 Исследование долговечности ЩМА

Долговечность ЩМА определяли согласно методике, разработанной Ю.И. Калгиным [148]. Проведение исследований и определение долговечности состояло из трех этапов: старение в процессе приготовления при предельно высоких температурах, моделирование старения асфальтобетона в летний период и полное водонасыщение образцов ЩМА с последующим испытанием на морозостойкость (попеременное замораживание и оттаивание образцов). Исследовали долговечность образцов ЩМА-15, модифицированных

керамзитовым порошком, и стандартных ЩМА-15 с добавкой Viator-66. Результаты испытаний представлены в таблице 3.27 и на рисунках 3.22, 3.23.

Таблица 3.27 – Показатели физико-механических свойств ЩМА после одного условного года эксплуатации

Наименование показателя	ЩМА-15, модиф. керамзитовым порошком				ЩМА-15 с добавкой Viatop-66				Значение согласно ГОСТ 31015-2002
	количество циклов замораживания и оттаивания								
	0	25	50	100	0	25	50	100	
Предел прочности при 20°С, $R_{мрз}$, МПа	4,8	4,42	4,03	3,7	4,3	3,87	3,61	3,1	≥2,5
Предел прочности при 50 °С, $R_{мрз}$, МПа	1,94	1,77	1,63	1,46	1,85	1,63	1,5	1,3	≥0,7
Коэффициент морозостойкости при 20°С, $k_{мрз}$	-	0,92	0,86	0,77	-	0,9	0,84	0,72	-
Коэффициент морозостойкости при 50°С, $k_{мрз}$	-	0,91	0,84	0,75	-	0,88	0,81	0,7	-
Водостойкость, $k_в$	0,99	0,95	0,91	0,89	0,92	0,9	0,86	0,83	≥0,9
Водостойкость при длительном водонасыщении, $k_{вд}$	0,91	0,84	0,79	0,77	0,82	0,78	0,76	0,73	≥0,75
Водонасыщение, W , % по объему	1,88	1,93	1,94	2,01	1,81	1,82	1,86	1,96	1,5-4,0

Согласно результатам исследований, морозостойкость образцов ЩМА-15 составила не менее 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Коэффициент морозостойкости как при температуре 20°C, так и при температуре 50 °C выше у ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.

Согласно графикам зависимостей изменения прочности при сжатии при 20 и 50°C (рисунок 3.22 и 3.23) на протяжении всего эксперимента прочностные характеристики ЩМА с традиционной стабилизирующей добавкой уступают модифицированным ЩМА.

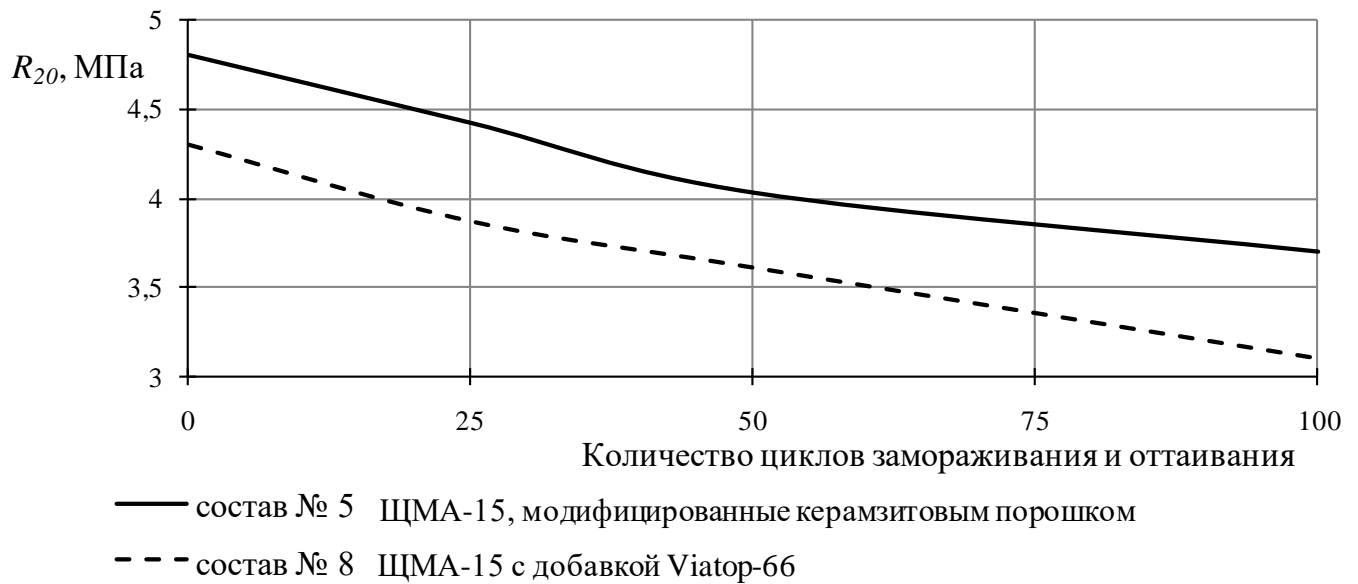


Рисунок 3.22 – Зависимости изменения прочности при сжатии R_{20} ЩМА от количества циклов замораживания и оттаивания

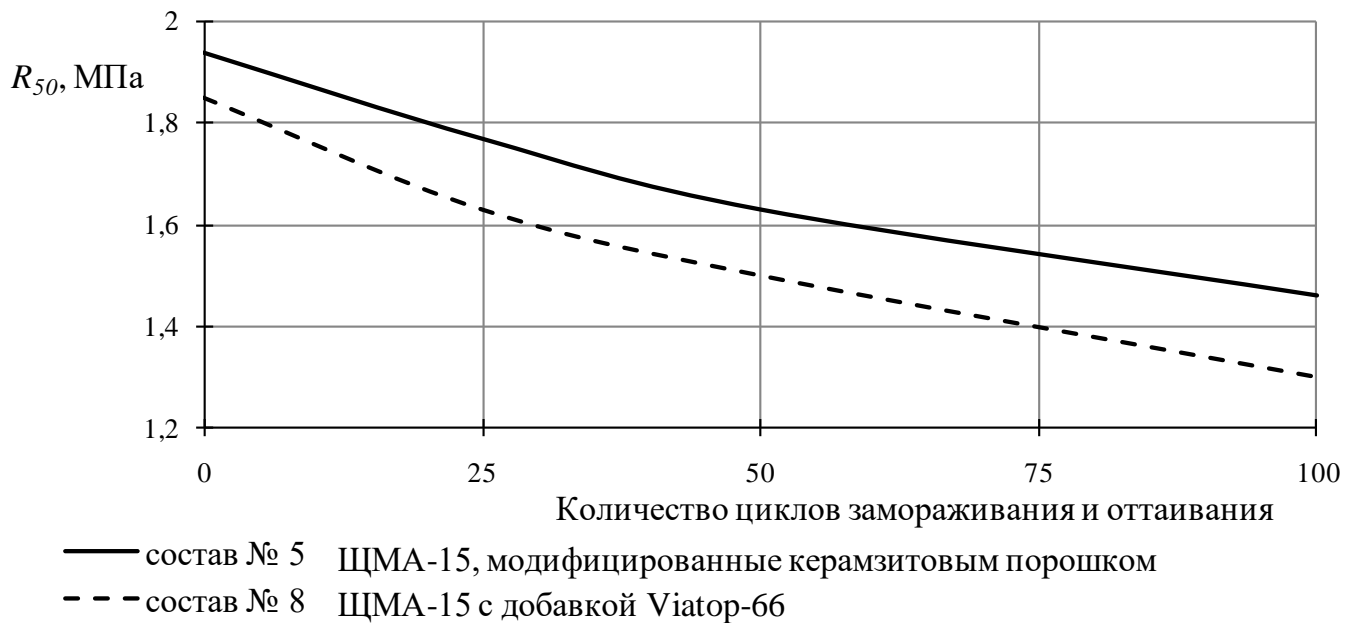


Рисунок 3.23 – Зависимости изменения прочности при сжатии R_{50} ЩМА от количества циклов замораживания и оттаивания

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенные ЩМА обладают более высокими физико-механическими показателями и морозостойкостью как сразу после приготовления, так и после одного условного года эксплуатации, что характеризует предложенные материалы как более долговечные.

3.10 Выводы

1. В ходе экспериментальных исследований подтверждена возможность использования керамзитового порошка для модификации ЩМАС с целью повышения физико-механических, структурно-механических, технологических и эксплуатационных свойств ЩМА.

2. В результате исследований морфологии и поверхности пористых порошковых материалов установлено, что из предложенных материалов наиболее развитой микроструктурой и системой пор обладает керамзитовый порошок. Выявлена высокая удельная поверхность керамзитового порошка (более 5000 г/см^2), которая значительно выше удельной поверхности известняковых минеральных порошков, а также его высокая дисперсность. Развитая микроструктура, высокая пористость и удельная поверхность керамзитового порошка обуславливает высокую адсорбционную и структурирующую способность керамзита к битумному вяжущему.

3. В результате математического планирования эксперимента выявлены регрессивные зависимости физико-механических свойств предложенных составов ЩМА от содержания керамзитового порошка. Разработаны оптимальные составы ЩМАС, модифицированные керамзитовым порошком. Экспериментально установлено оптимальное содержание керамзитового порошка C_k в ЩМАС, которое составляет $2,5 \pm 0,03 \%$ сверх 100% минеральной части смеси.

4. Выявлено, что введение керамзитового порошка в ЩМА в оптимальном количестве способствует повышению прочностных характеристик (R_0 , R_{20} , R_{50}), водостойкости и водостойкости при длительном водонасыщении (k_6 , k_{60}).

5. Согласно исследованиям реологических характеристик ЩМА показано, что использование керамзитового порошка в щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях повышает сдвигоустойчивость и трещиностойкость ЩМА. Установлены более высокие показатели вязкости и жесткости при высоких летних температурах, а также более низкие вязкость и жесткость при отрицательных температурах щебеночно-мастичных асфальтобетонов, модифицированных керамзитовым порошком, в сравнении со стандартными

ЩМА. Выявлено, что включение в составы ЩМАС керамзитового порошка не снижает износостойкость ЩМА.

6. Установлено, что применение керамзитового порошка в ЩМА приводит к повышению трещиностойкости и сдвигоустойчивости материала. Максимальные показатели сдвигоустойчивости и трещиностойкости выявлены у образцов ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, которые составили : $tg\varphi = 0,96$, $C_{\pi} = 0,31$ МПа, $R_p = 6,28$ МПа.

7. Показатели стекаемости ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком, соответствуют требованиям ГОСТ 31015-2002. Выявлено, что с увеличением содержания керамзитового порошка в смеси показатели стекаемости (В) ЩМАС устойчиво снижаются.

8. В результате экспериментальных исследований установлена высокая морозостойкость образцов ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, которая составила более 125 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Коэффициенты морозостойкости ($k_{мпз}$) разработанных ЩМА выше чем $k_{мпз}$ ЩМА со стандартными стабилизирующими добавками и составили для ЩМА-10 – 0,75; для ЩМА-15 – 0,76.

9. Установлено, что модификация щебеночно-мастичных асфальтобетонов керамзитовым порошком повышает их долговечность. По истечении одного условного года эксплуатации показатели свойств разработанных ЩМА выше аналогичных показателей ЩМА традиционных составов.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ, ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО- МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЕРАМЗИТОВЫМ ПОРОШКОМ

4.1 Разработка технологии приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей

Одним из направлений регулирования качества асфальтобетонов и битумоминеральных композиций является подбор оптимальных технологических параметров и режимов приготовления смесей, таких как температура перемешивания $T_{\text{п}}$, время перемешивания $t_{\text{п}}$, точность дозирования компонентов, последовательность их введения в смеситель и т. д.

В работе, с целью оптимизации технологии производства ЩМАС, исследовали влияние температуры перемешивания и последовательности введения компонентов смеси на физико-механические свойства ЩМА.

4.1.1 Влияние температуры перемешивания ЩМАС на физико-механические свойства ЩМА

Важнейшим условием получения высококачественных асфальтобетонных смесей является подбор и соблюдение оптимального температурного режима приготовления. Согласно ГОСТ 31015-2002 температура ЩМАС в зависимости от применяемого битумного вяжущего при отгрузке потребителю и при укладке должна соответствовать значениям, указанным в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Температура ЩМАС в зависимости от применяемого битумного вяжущего

Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при температуре 25°C	Температура, °C	
	при отгрузке	при укладке, не менее
От 40 до 60 включ.	От 160 до 175	150
Св. 60 до 90 включ.	От 155 до 170	145
Св. 90 до 130 включ.	От 150 до 165	140
Св. 130 до 200	От 140 до 160	135

Влияние температуры перемешивания $T_{\text{п}}$ щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей на физико-механические свойства ЩМА определяли путем оценки показателей прочности R_{20} , теплостойкости R_{50} и водостойкости ($k_{\text{в}}$ и $k_{\text{вд}}$) образцов ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, приготовленных при различных температурах перемешивания. Температуру перемешивания изменяли с шагом в 5 °С, температурный интервал варьирования 155 – 175 °С. Значения полученных физико-механических свойств ЩМА приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Влияние температуры перемешивания $T_{\text{п}}$ на физико-механические свойства ЩМА-10 и ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком

Показатель	Температура приготовления, °С							
	ЩМА-10				ЩМА-15			
	160	165	170	175	160	165	170	175
Предел прочности при сжатии, МПа:								
при 0°С, R_0	8,07	8,64	8,35	8,21	8,59	9,2	8,89	8,76
при 20°С, R_{20}	4,3	4,71	4,55	4,42	4,37	4,78	4,62	4,53
при 50 °С, R_{50}	1,7	1,9	1,83	1,79	1,74	1,92	1,85	1,82
Водостойкость, $k_{\text{в}}$	0,89	0,96	0,93	0,92	0,9	0,97	0,94	0,94
Водостойкость при длительном водонасыщении, $k_{\text{вд}}$	0,81	0,87	0,84	0,82	0,84	0,9	0,87	0,86
Водонасыщение, W , % по объему	2,28	2,2	2,16	2,1	2,18	2,12	2,07	1,99

Согласно полученным результатам испытаний, наиболее высокими показателями прочности и водостойкости обладают смеси ЩМА-10 и ЩМА-15, приготовленные при температуре $T_{\text{п}}$ 165 °С. При повышении температуры перемешивания показатели прочности и водостойкости ЩМА снижаются, водонасыщение повышается. При снижении $T_{\text{п}}$ ниже 165 °С прочность и водостойкость значительно понижаются, показатели водонасыщения практически не изменяются.

4.1.2 Влияние последовательности введения в смеситель компонентов ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком, на физико-механические свойства ЩМА

Важнейшим этапом приготовления асфальтобетонной смеси является объединение минеральных материалов с битумом. Наиболее активный период структурообразования асфальтобетона происходит от момента смешивания компонентов смеси до ее укладки в слой дорожной одежды. В процессе перемешивания все минеральные составляющие смеси должны равномерно покрываться битумной пленкой.

В настоящее время приготовление асфальтобетонных смесей осуществляется по технологической схеме, предполагающей одновременную подачу и перемешивание щебня, песка, минерального порошка и битума. Основная часть битума объединяется с минеральным порошком, что обуславливается высокой поверхностной активности его зерен, вследствие чего смачивание поверхности щебня и песка битумом ухудшается.

Согласно исследованиям [16], введение минерального порошка в смеситель одновременно со щебнем и песком ухудшает смачивание зерен щебня и песка с битумом за счет прилипания к их поверхности частиц минерального порошка. По мнению Волкова М.И., Королева И.В. улучшить смачивание битумом каменного материала возможно путем введения минерального порошка после перемешивания щебня и песка с битумом. В результате этого достигается более совершенное распределение асфальтового вяжущего, что повышает плотность, прочность и водостойкость системы [16, 23].

С целью оптимизации технологии приготовления щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси исследовали влияние последовательности введения компонентов ЩМАС на свойства ЩМА.

Исследования проводили по двум вариантам:

1 вариант: приготовление ЩМАС происходило по стандартной технологии: разогрев до требуемой температуры и дозирование минерального заполнителя (мз), активированного минерального порошка (мп), керамзитового порошка (кп) и

битума (б); затем подача в смеситель и совместное перемешивание всех компонентов: мз + мп + кп + б;

2 вариант: нагретые до требуемой температуры и отдозированные минеральный заполнитель (мз) и битум (б) подаются в смеситель и перемешиваются, затем добавляется в смеситель отдозированный керамзитовый порошок (кп) и в заключение в смеситель подается отдозированный активированный минеральный порошок (мп):

$((\text{мз} + \text{б}) + \text{кп}) + \text{мп}$.

Из приготовленных по предложенным вариантам модифицированных ЩМАС изготавливались образцы, которые испытывали на прочность при сжатии при 20 и 50 °С (R_{20} , R_{50}), определяли водостойкость (k_v и k_{vd}) и водонасыщение (W). Результаты испытаний представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Физико-механические свойства ЩМА-10 и ЩМА-15

Показатели	1-вариант, мз + мп + кп + б		2-вариант, $((\text{мз} + \text{б}) + \text{кп}) + \text{мп}$	
	ЩМА-10	ЩМА-15	ЩМА-10	ЩМА-15
Предел прочности при сжатии, МПа:				
при 20 °С, R_{20}	4,12	4,31	4,52	4,73
при 50 °С, R_{50}	1,61	1,67	1,8	1,88
Водостойкость, k_v	0,89	0,93	0,94	0,98
Водостойкость при длительном водонасыщении, k_{vd}	0,79	0,82	0,8	0,84
Водонасыщение, W % по объему	2,4	2,31	2,25	2,1

Наиболее высокими показателями прочности и водостойкости обладают ЩМА, приготовленные по второму варианту.

Таким образом, последовательность введения компонентов ЩМАС в смеситель по схеме $((\text{мз} + \text{б}) + \text{кп}) + \text{мп}$ (второй вариант), предполагающей предварительное перемешивание битума и заполнителя с последующей подачей керамзитового, а затем минерального порошков является наиболее рациональной.

4.1.3 Технология приготовления ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком

На основании результатов исследования оптимизации технологических параметров приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, была разработана технология производства ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком.

Приготовление предложенных ЩМАС осуществляется следующим образом:

- щебень, песок из отсеков дробления нагреваются и дозируются до температуры $165 \pm 1,5$ °C;

- минеральный порошок, керамзитовый порошок дозируются (введение в смеситель минерального и керамзитового порошка без нагрева снижает температуру смеси и требует нагрева минеральных материалов до более высокой температуры, поэтому рекомендуется по возможности нагрев минерального порошка, так как в ЩМАС его содержание достигает 13-15 %, что можно обеспечить применением специальных агрегатов нагрева (теплообменниках), в которых отсутствует контакт минерального порошка с горячими газами, то есть нагрев производится через металлический экран (стенку)) [177].

- нагрев и обезвоживание битума производится при температурах 150 – 170 °C;

- погрешность дозирования компонентов смеси не должна превышать для щебня и песка из отсеков дробления ± 2 %, для битума $\pm 1,5$; минерального порошка ± 3 %, керамзитового порошка ± 3 % от массы соответствующего компонента.

Технологический процесс приготовления ЩМАС состоял из следующих этапов:

- подготовка, нагрев до температуры $165 \pm 1,5$ °C и дозирование щебня, песка из отсеков дробления и битума;

- подача в смеситель и перемешивание щебня и песка из отсеков дробления с битумом;

- дозирование и подача керамзитового порошка, перемешивание;
- дозирование и подача активированного минерального порошка, перемешивание с последующей выгрузкой.

Схема приготовления ЦМАС, модифицированных керамзитовым порошком, представлена на рисунке 4.1.

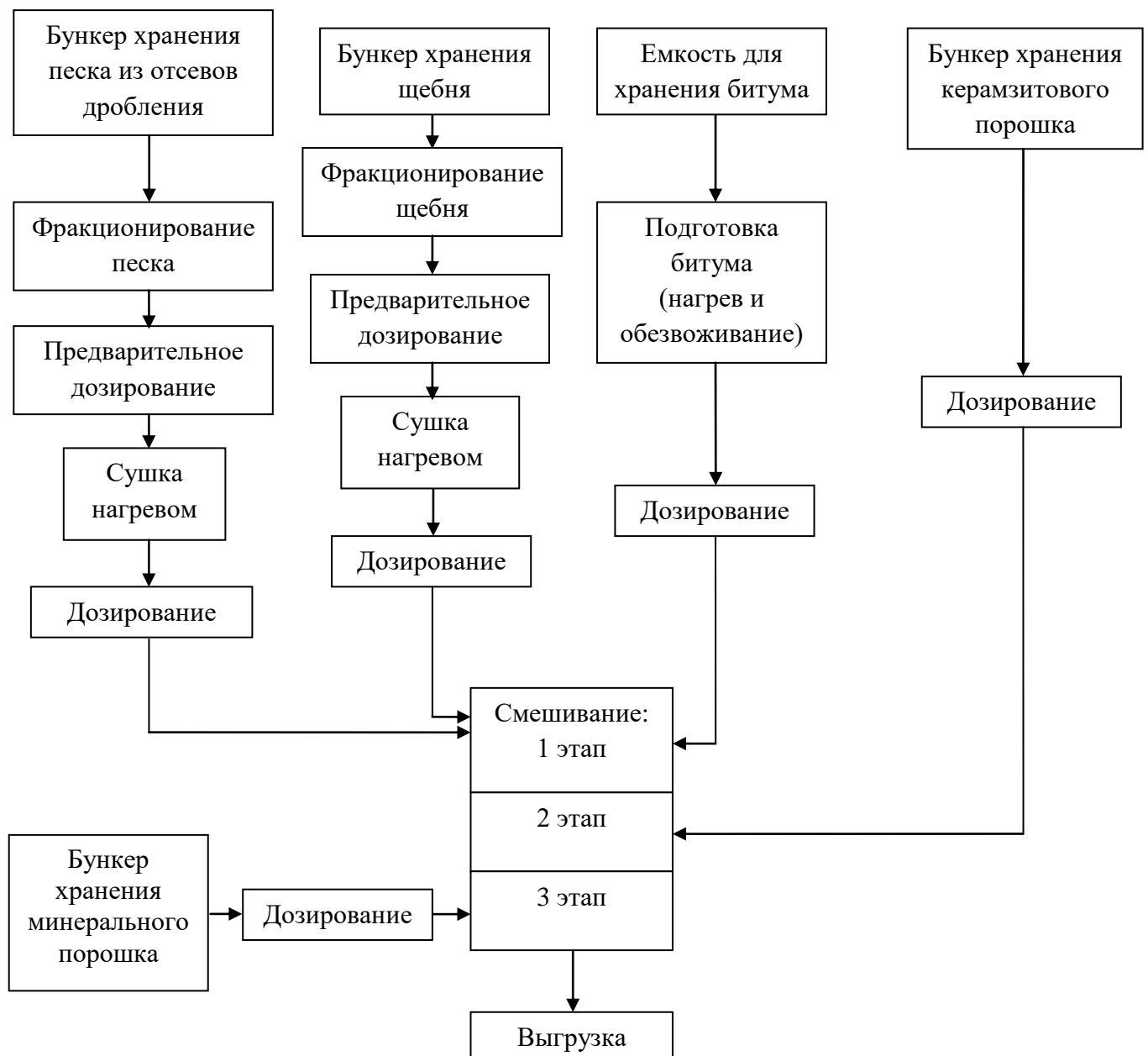


Рисунок 4.1 – Схема приготовления ЦМАС, модифицированных керамзитовым порошком

4.2 Конструкция дорожной одежды с покрытием из ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком

На основании анализа конструкций дорожных одежд с покрытиями из ЩМА разработана оригинальная конструкция дорожной одежды (рис. 4.2), включающая покрытие из разработанных составов ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком, состоящая из: подстилающего слоя; слоя уплотненного песка (толщиной 360 мм); уплотненного щебня (толщиной 300 мм); слоя горячего крупнозернистого пористого асфальтобетона (толщиной 70 мм); слоя покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона, модифицированного керамзитовым порошком (толщиной 40 мм). В настоящее время на предложенную конструкцию подана заявка на объект интеллектуальной собственности (патент РФ).

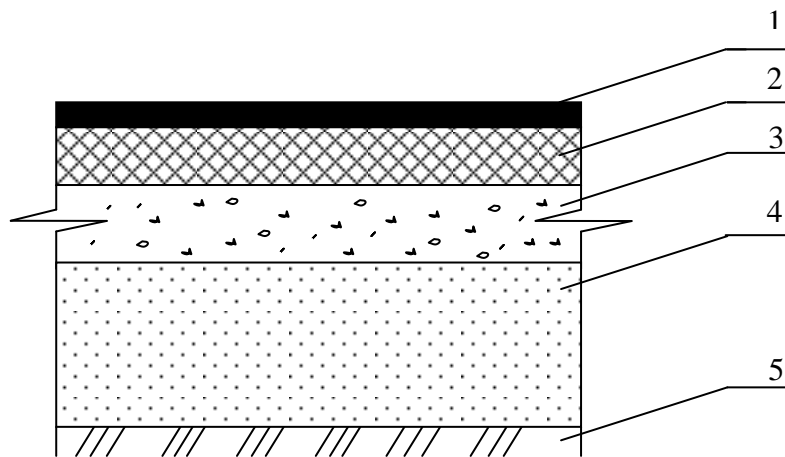


Рисунок 4.2 – Конструкция дорожной одежды: 1 – слой покрытия из ЩМА ($\delta = 40$ мм), модифицированного керамзитовым порошком; 2 – горячий крупнозернистый пористый асфальтобетон ($\delta = 70$ мм); 3 – слой уплотненного щебня ($\delta = 300$ мм); 4 – слой уплотненного песка ($\delta = 360$ мм); 5 – подстилающий слой

4.3 Опытные-промышленные испытания ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком

В июле 2013 года на АБЗ ООО «Джули» г. Ставрополе была выпущена опытная партия щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси марки ЩМА-15, модифицированной керамзитовым порошком. ЩМАС приготавливали из щебня

кубовидной формы (свойства щебня представлены в таблице 4.4), песка из отсеков дробления щебня (свойства отсеков дробления приведены в таблице 4.5), активированного минерального порошка (свойства минерального порошка представлены в таблице 4.6), битума марки БНД 60/90 (свойства битума представлены в таблице 4.7), модифицированного керамзитовым порошком (свойства керамзитового порошка представлены в таблице 4.8).

Таблица 4.4 – Свойства щебня ГУП СК «Кочубеевский карьер»

№ п/п	Наименование показателей	Фактические показатели	Требования ГОСТ 8267-93
1	Содержание дробленых зерен по массе, % не менее	85	85
2	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы по массе, % не более	15	15
4	Содержание зерен слабых пород по массе, % не более	2,8	5
5	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе не более	1	2
6	Содержание глины в комках, % по массе не более	Нет	0,25
7	Марка по дробимости не менее	1000	1000
8	Марка по истираемости	И1	И1
9	Марка по морозостойкости, не ниже	F150	F50
10	Марка по пластичности (ГОСТ 25607-94)	Пл1	Пл1 – Пл2
11	Марка по водостойкости (ГОСТ 25607-94)	В1	В1 – В2
12	Насыпная плотность ρ_n , кг/м ³	1318	-

Таблица 4.5 – Свойства песка из отсевов дробления щебня ГУП СК
«Кочубеевский карьер»

№ п/п	Наименование показателей	Фактические показатели	Требования ГОСТ 8736-93
1	Истинная плотность, кг/м ³	2628	-
2	Средняя плотность, кг/м ³	2621	-
4	Насыпная плотность, кг/м ³	1540	-
5	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе не более	0,96	2
6	Марка по дробимости, не менее	1000	1000
7	Марка по истираемости	И1	И1
8	Марка по морозостойкости, не ниже	F150	F50

Таблица 4.6 – Свойства активированного минерального порошка ЗАО
"Известняк" Джегонаского карьера

№ п/п	Наименование показателей	Эксперимен- тальные показатели	Требования ГОСТ Р 52129-2003 для МП-1
1	Зерновой состав, % по массе мельче 1,25 " 0,315 " " 0,071 "	100 98,6 83,2	не менее 100 не менее 90 не менее 80
2	Пористость, % по объему, не более	26	30
3	Набухание образцов из смеси минерального порошка с битумом, %, не более	0,38	1,8
4	Водостойкость образцов из смеси минерального порошка с битумом	0,97	-
5	Показатель битумоемкости, г	57,8	-
6	Истинная плотность ρ , кг/м ³	2734	-
7	Средняя плотность уплотненного порошка, кг/м ³	1921	-
8	Насыпная плотность, кг/м ³	1215	-

Таблица 4.7 – Свойства битума БНД 60/90 Саратовского НПЗ

№ п/п	Показатель	Фактические показатели	Методы испытаний
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм:		
	а) при 25 °С;	77	ГОСТ 11501-78
	б) при 0 °С	24	ГОСТ 11501-78
2	Температура размягчения по КиШ, °С	50	ГОСТ 11506-73
3	Растяжимость при 25 °С, см	94	ГОСТ 11505-75
4	Температура хрупкости по Фраасу, °С	-19	ГОСТ 11507-78
5	Температура вспышки, °С	239	ГОСТ 4333-88
6	Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	3	ГОСТ 18180-72
7	Индекс пенетрации	+0,3	ГОСТ 22245-90

Таблица 4.8 – Свойства керамзитового порошка

№ п/п	Наименование показателей	Экспериментальные показатели	ГОСТ 52129-2003 для МП-1
1	Зерновой состав, % по массе		
	мельче 1,25	100	не менее 100
	” 0,315 ”	100	не менее 90
	” 0,071 ”	81,5	не менее 80
2	Пористость, $V_{пор}$, % по объему, не более	36	30
3	Насыпная плотность, ρ_n , г/см ³	0,88	-
4	Удельная поверхность, см ² /г	5280	-
5	Истинная плотность, ρ , г/см ³	2,57	-

Содержание керамзитового порошка в ЦМАС составило $2,5 \pm 0,03$ % сверх 100 % массы минерального материала. Устройство верхнего слоя дорожной одежды из опытной партии щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЦМА-15), модифицированного керамзитовым порошком, было осуществлено ООО «Джули» в г. Ставрополь по пр. Кулакова. Площадь покрытия составила 1050 м², толщина 4 см. Производство опытно-промышленной партии ЦМАС было выполнено по разработанной технологической схеме (рисунок 4.2). Укладка смеси в верхний

слой покрытия осуществлялась самоходным асфальтоукладчиком ДС-195 (СТУ 22-145-66). Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь уплотнялась сначала 7 тонным виброкатком ДУ-97 (4-5 проходов), а затем 14 тонным катком с гладкими вальцами ДУ-84Б до достижения отсутствия следов от катка (4-6 проходов).

После укладки опытной партии ЩМА-15, через 2 суток были взяты вырубki и испытаны. Физико-механические свойства образцов ЩМА-15, взятых из смесителя на АБЗ и заформованных в лаборатории (№ 1), и вырубков (№ 2) представлены в таблице 4.9.

При взятии вырубков отмечено хорошее прилипание верхнего слоя к основанию из крупнозернистого пористого асфальтобетона.

По прошествии 4 лет эксплуатации покрытие находится в хорошем состоянии: отсутствует колейность, другие внешние дефекты, нарушение сплошности покрытия, битумные пятна.

Таблица 4.9 – Физико-механические свойства проб и вырубков опытно-промышленной партии ЩМА-15 с содержанием керамзитового порошка в количестве 2,5 % масс.

Показатели	№ пробы	
	1	2
	из смесителя испытано в возрасте 1 суток	из вырубки в возрасте 2 суток
Предел прочности при сжатии, МПа: при 0°C, R_0	1,85	1,69
при 20°C, R_{20}	4,41	4,22
при 50 °C, R_{50}	8,87	8,14
Водостойкость, k_g	0,93	0,91
Водостойкость при длительном водонасыщении, k_{gd}	0,8	0,79
Набухание, H % по объему	0,54	0,57
Водонасыщение, W % по объему	1,91	1,94

4.4 Расчет экономического эффекта от производства и применения ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком

Был проведен расчет стоимости работ по производству и укладке разработанных ЩМА-15 в сравнении с традиционными составами. Экономический эффект рассчитывался по разнице себестоимости производства и укладки разработанных ЩМА-15 и традиционных составов ЩМА-15 с добавкой Viator-66.

Расчет калькуляции себестоимости приготовления, производства и укладки ЩМА представлен в таблицах 4.10, 4.11. Расчет годового экономического эффекта рассматриваемых вариантов от изменения себестоимости укладки предложенных ЩМА-15 велся согласно [174, 175] по формуле;

$$\mathcal{E} = (C_c - C_n) \times A_n, \quad (4.1)$$

где C_c и C_n - себестоимости единицы продукции базового и расчетного вариантов, руб.; A_n - объем выпуска продукции в расчетном году, натуральные единицы.

Расчет велся в реальных ценах 2017 года.

Подтвержденный экономический эффект от снижения себестоимости на производство и укладку 100 м² покрытия из предложенного ЩМА-15, модифицированного керамзитовым порошком, в сравнении с ЩМА-15 с использованием стабилизирующей добавки Viator-66 в ценах 2017 года составил 1707 руб. Ожидаемый экономический эффект от изменения себестоимости производства и укладки покрытия (при объеме 1000 м³) из модифицированных ЩМА-15 составит 426,75 тыс. руб.

Таблица 4.10 – Калькуляция себестоимости приготовления 100 тонн ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком

Наименование показателя	Ед. изм.	Цена за ед. руб.	ЩМА-15, модифицированный керамзитовым порошком		ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viatorp-66	
			количество	сумма	количество	сумма
Прямые материальные затраты:						
а) битум БНД 60/90	т	10800	5,6	60480	5,6	60480
б) щебень фракции 5-15 мм	т	1270	65	82550	65,6	83312
в) песок из отсеков дробления	т	400	15,5	6200	16,2	6480
г) активированный минеральный порошок	т	1100	11,5	12650	12,2	13420
д) керамзитовый порошок	т	3000	2,4	7200	-	-
е) стабилизирующая добавка Viatorp-66	т	43700	-	-	0,4	17480
Электроэнергия	руб.	-	-	1641,0	-	1484,0
Вода, канализация	руб.	-	-	112,0	-	112,0
Топливо (газ)	руб.	-	-	2570,0	-	2570,0
Аренда земли, ОС	руб.	-	-	2239,0	-	2239,0
ГСМ	руб.	-	-	1620,0	-	1610,0
Амортизация	руб.	-	-	781,0	-	781,0
Заработная плата	руб.	-	-	5249,0	-	5161,0
Начисления на з/п	руб.	-	-	1954,0	-	1948,0
Накладные расходы	руб.	-	-	3771,0	-	3771,0
ИТОГО:	руб.	-	-	189017,0	-	200848,0
Рентабельность, 10%	руб.	-	-	18902,0	-	20084,8
ВСЕГО:	руб.	-	-	207919,0	-	220932,8
Всего с НДС 18%	руб.	-	-	245345,0	-	263297,0

Таблица 4.11 – Калькуляция на производство и укладку 100 м² покрытия (толщина слоя 4 см) ЩМА-15, модифицированным керамзитовым порошком и с ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66 (АБЗ ООО «Джули» в г. Ставрополь)

Исходные данные:

1. Дорожные рабочие – 6 чел.

2. Машины и механизмы: КАМАЗ 5511 – 3, каток ДУ-84 – 1

Наименование затрат	Обоснование стоимости	Ед. изм.	Количество	ЩМА-15, модифицированный керамзитовым порошком		ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66	
				цена, руб.	стоим., руб	цена, руб.	стоим., руб
Стоимость смеси	Планово-расчетная цена	м ²	100	245,35	24535,0	262,70	26270,0
Эксплуатация машин и механизмов в т. ч. заработная плата - КАМАЗ 5511	Планово-расчетная цена	м/час	3×8=24	<u>317,48</u> 65,78	<u>7619,52</u> 1578,72	<u>317,48</u> 65,78	<u>7619,52</u> 1578,72
- Каток ДУ-84	Планово-расчетная цена	м/час	8	<u>235,32</u> 65,78	<u>1882,53</u> 526,27	<u>235,32</u> 65,78	<u>1882,53</u> 526,27
Основная заработная плата	Планово-расчетная цена	ч/час	6×8=48	40,72	1964,40	40,72	1964,40
Итого в т.ч. з/плата	МАС 81-9.44			36001,45	4069,39	37796,45	4069,39
Накладные расходы	МАС 81-25.2001		133% от з/п		5412,29		5412,29
Плановые накопления			95% от з/п		3865,92		3865,92
ИТОГО:					45279,66		47074,66
Вахтовый метод работ			4,4%		1992,3		2071,3
ИТОГО:		м ²	100		47272,0		49146,0

4.5 Выводы

1. В результате исследования влияния температуры приготовления на физико-механические свойства ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком, установлена оптимальная температура перемешивания ЩМАС ($T_{\text{п}}$), которая составила $165 \pm 1,5$ °С. На основании проведенных испытаний выявлена оптимальная последовательность подачи компонентов ЩМАС, модифицированных керамзитовым порошком, в смеситель: нагретые до требуемой температуры и отдозированные минеральный наполнитель и битум подаются в смеситель и перемешиваются, затем добавляется в смеситель и перемешивается отдозированный керамзитовый порошок и в заключении подается и перемешивается отдозированный активированный минеральный порошок.

2. Разработана технология производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением керамзитового порошка, позволяющая использовать стандартное оборудование для производства ЩМАС.

3. На АБЗ ООО «Джули» в г. Ставрополе в 2013 году была выпущена опытно-промышленная партия смеси ЩМА-15, модифицированной керамзитовым порошком, из которой был уложен верхний слой покрытия автомобильной дороги в г. Ставрополь. Проведенные испытания проб, взятых на АБЗ, и вырубок из уложенного покрытия показали высокие физико-механические свойства разработанных ЩМАС.

4. Подтвержденный экономический эффект от снижения себестоимости на производство и укладку ЩМА-15, модифицированных керамзитовым порошком, в сравнении с ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66 составил 1707 руб. на 100 м² покрытия в ценах 2017 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

1. На основании критического анализа отечественной и зарубежной научно-технической и патентной литературы обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения в составах щебеночно-мастичных асфальтобетонов пористых порошковых материалов в качестве добавок, повышающих их качество и технологичность.

2. В результате теоретических исследований выявлены направления улучшения качества щебеночно-мастичных асфальтобетонов за счет повышения сдвигоустойчивости, трещиностойкости, морозостойкости щебеночно-мастичных асфальтобетонов и адсорбционной активности минерального материала щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей путем управления процессами структурообразования битумных связующих, на основании применения в их составах высокодисперсных пористых порошковых материалов в качестве структурирующих и стабилизирующих добавок.

3. На основании экспериментально установленных зависимостей влияния содержания различных пористых порошков на свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов установлено, что наиболее эффективным модификатором, позволяющим существенно снизить сегрегацию вяжущего в смеси и значительно повысить физико-механические и эксплуатационные свойства щебеночно-мастичных асфальтобетонов, является керамзитовый порошок. Это обуславливается выявленными на микроуровне особенностями структуры и топографии поверхности высокодисперсных частиц керамзита, которые обладают высокоразвитой шероховатой поверхностью, осложненной пиками, микротрещинами, неровностями и большим количеством различных по размерам и форме пор.

4. Разработаны рациональные составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, модифицированных керамзитовым порошком. Отличительной особенностью предложенных составов щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей является использование добавки из керамзитового

порошка фракций менее 0,16 мм в количестве $2,5 \pm 0,03$ % сверх массы минерального материала взамен рекомендованных ГОСТ стабилизирующих добавок.

5. Исследованиями зависимостей реологических параметров щебеночно-мастичных асфальтобетонов от эксплуатационных температур выявлено, что щебеночно-мастичные асфальтобетоны, с применением керамзитового порошка, обладают повышенной деформационной устойчивостью при высоких эксплуатационных температурах (60 °С) и повышенной деформативностью при отрицательных температурах (–10 °С), по сравнению со стандартными составами ЩМА. Результаты реологических исследований хорошо согласуются с результатами исследований сдвигоустойчивости, трещиностойкости, морозостойкости и долговечности предложенных ЩМА. Экспериментально установлено, что наличие керамзитового порошка в составах ЩМАС повышает сдвигоустойчивость (сцепление C_π 12,5 – 29 %, коэффициент внутреннего трения $tg\varphi$ на 1 – 2 %), трещиностойкость (предел прочности на растяжение при расколе R_p на 6 – 8 %), морозостойкость и долговечность щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

6. Разработана технологическая схема производства модифицированных керамзитовым порошком щебеночно-мастичных асфальтобетонов, позволяющая использовать стандартное современное оборудование, применяемое для производства традиционных щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. В результате оптимизации технологии приготовления модифицированных ЩМАС определена оптимальная температура перемешивания смеси в процессе приготовления $T_{\text{п}}$, которая составила 165 ± 2 °С, и установлена рациональная схема порядка введения компонентов ЩМАС в смеситель, заключающаяся в последовательной подаче и перемешивании нагретых и дозированных минерального заполнителя (мз) и битумного вяжущего (б), затем керамзитового порошка (кп) и, в заключении, минерального наполнителя (мп): ((мз + б) + кп) + мп. Соблюдение предложенных технологических режимов и параметров обеспечивает образование наиболее эффективной структуры ЩМА и получение

наиболее высоких значений физико-механических и эксплуатационных показателей материала.

7. Подтвержденный экономический эффект от снижения себестоимости производства и укладки 100 м^2 покрытия из предложенного щебеночно-мастичного асфальтобетона марки ЩМА-15, модифицированного керамзитовым порошком, по сравнению с ЩМА-15 со стабилизирующей добавкой Viator-66, составил 1707 руб. на 100 м^2 .

Рекомендации. Разработанные в диссертационной работе щебеночно-мастичные асфальтобетоны, модифицированные керамзитовым порошком, могут быть применены для устройства верхних слоев покрытий автомобильных дорог, городских улиц, площадей, мостов и аэродромов.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшим развитием темы является следующее:

1. Разработка и проектирование составов всего спектра марок ЩМА, модифицированных керамзитовым порошком.

2. Углубленные экспериментальные исследования влияния применения пористых порошковых материалов в асфальтовяжущих ЩМАС на основе различных марок битумов и разработка физико-химических основ их применения в ЩМА.

3. Разработка технической документации, технических регламентов на производство и укладку предложенных составов ЩМА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов, В. Н. Изготовление изделий из асфальтобетонных смесей: учеб. пособие [Текст] / В. Н. Давыдов. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 208 с.
2. Алхимова, Н. Задача первостепенного значения [Текст] / Н. Алхимова // Автомобильные дороги. – 2006. – №11. – С. 8-11.
3. Рыбьев, И. А. Асфальтовые бетоны [Текст] / И. А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1969. – 399 с.
4. Королев, И. В. Дорожно-строительные материалы [Текст] / И. В. Королев, В. Н. Финашин, Г. К. Фендер. – М.: Транспорт, 1988. – 304 с.
5. Кострин, К. В. Тысячелетняя история асфальта [Текст] / К. В. Кострин // Автомобильные дороги. – 1965. – №12. – С. 27-28.
6. Дорожный асфальтобетон [Текст] / Н. Н. Иванов [и др.] ; под ред. Л. Б. Гезенцвея. – М.: Транспорт, 1976. – 336 с.
7. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение [Текст] / И. А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.
8. Гезенцвей, Л. Б. Асфальтовый бетон [Текст] / Л. Б. Гезенцвей. – М.: Стройиздат, 1964. – 477 с.
9. Королев, И. В. Дорожный теплый асфальтобетон [Текст] / И. В. Королев. – Киев: Вища школа, 1975. – 156 с.
10. Печеный, Б. Г. Битумы и битумные композиции [Текст] / Б. Г. Печеный. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
11. Гезенцвей Л. Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов [Текст]. – М.: Стройиздат, 1971. – 225 с.
12. Дорожный асфальтобетон [Текст] / под ред. Л. Б. Гезенцвея. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
13. Богуславский, А. М. Асфальтобетонные покрытия [Текст] / А. М. Богуславский, Л. Г. Ефремов. – М.: МАДИ, 1981. – 146 с.
14. Королев, И. В. Асфальтобетонные покрытия [Текст] / И. В. Королев, В. А. Золотарев, В. А. Ступивцев. – Донецк: Издательство «Донбасс», 1970. – 161 с.

15. Сюньи, Г. С. Дорожный асфальтовый бетон [Текст] / Г. С. Сюньи. – Киев: Литература по строительству и архитектуре УССР, 1962. – 235с.
16. Волков, М. И. Асфальтобетонные покрытия [Текст] / М. И. Волков. – Донецк: Донбасс, 1970. – 162 с.
17. Богуславский, А. М. Дорожные асфальтобетонные покрытия [Текст] / А. М. Богуславский. – М.: Транспорт, 1965. – 112 с.
18. Богуславский, А. М. Основы реологии асфальтобетона [Текст] / А. М. Богуславский, А. А. Богуславский. – М.: Высшая школа, 1972. – 200 с.
19. Дорожно-строительные материалы [Текст] / М. И. Волков [и др.]. – М.: Транспорт, 1975. – 527 с.
20. Руденский, А. В. Реологические свойства битумоминеральных материалов [Текст] / А. В. Руденский, И. М. Руденская. – М.: Высшая школа, 1971. – 131 с.
21. Сюньи, Г. К. Цветной асфальтовый бетон [Текст] / Г. К. Сюньи. – М.: Транспорт, 1964. – 50 с.
22. Сюньи, Г. К. Регенерированный дорожный асфальтобетон [Текст] / Г. К. Сюньи, К. Х. Усманов, Э. С. Файнберг. – М.: Транспорт, 1984. – 118 с.
23. Дорожный теплый асфальтобетон [Текст] / И. В. Королев и др. – К.: Вища школа, 1984. – 200 с.
24. Стабников, Н. В. Асфальтополимерные материалы для гидроизоляции промышленных и гидротехнических сооружений [Текст] / Н. В. Стабников. – Л.: Стройиздат, 1975. – 146 с.
25. Stabnikov, N. V. Beson derheiten beim Bauvon Aspchalbeton dichtungen fur wasser bauten in der Sowjetunion [Text] / N. V. Stabnikov, S. N. Poptchenko, G. V. Bousow // Wissenschaftliche Zeitzchrift der Hochschule fur Architekture und Bauwesen. – Weimar 21 jahragang. – 1974.
26. Стабников, Н. В. Гидротехнический асфальтобетон [Текст]: автореф. дис. д-ра техн. наук / Н. В. Стабников. – Л., 1981. – 42 с.

27. Рыбьев, И. А. Создание строительных материалов с заданными свойствами [Текст] / И. А. Рыбьев, А. А, Жданов // Известия вузов. Строительство. – 2003. – №3. – С. 45-48.

28. Ковалев, Я.Н. Активационные технологии дорожных композиционных материалов (научно-практические основы) [Текст] / Я.Н. Ковалев. – Мн.: Беларуская Энцыклапедыя, 2002. – 334 с.

29. Котлярский, Э. В. Формирование структуры и свойств асфальтобетона в процессе уплотнения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Котлярский Эдуард Владимирович; МАДИ. – М., 1990 – 26 с.

30. Васильев, Ю. Э. Разработка принципиальной концепции единой общей методической основы испытаний дорожно-строительных материалов и конструкций на примере асфальтобетонных смесей, асфальтобетона и асфальтобетонных конструкций дорожной одежды [Текст] / Ю. Э. Васильев, Г. И. Евгеньев, Э. В. Котлярский, С. С. Толоконников // Методы и средства повышения надежности материалов и сооружений на автодорогах с учетом транспортных воздействий. Сб. научн. трудов МАДИ. – М., 1996. – С. 187-194.

31. Гегелия, Д. И. Закономерности изменения некоторых расчетных параметров асфальтобетонов при длительном воздействии воды и знакопеременных температур [Текст] / Д. И. Гегелия // Сб. научн. тр. Союздорпип. – Балашиха. 1981. – №100. – С. 113-121.

32. Панина, Л. Г. К вопросу об однородности структуры конгломератов из битумомиперальных смесей [Текст] / Л. Г. Панина // Сб. научн. тр.: Пути экономии материальных и энергетических ресурсов при ремонте и реконструкции автомобильных дорог. – М: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. 1989. – Вып. 1– С. 11-20.

33. Королев, В. И. Принципы направленного структурообразования асфальтобетона [Текст] / В. И. Королев // Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов: материалы докладов всесоюзной конференции. – Харьков, 1983. – С. 8-9.

34. Грушко, И. М. Дорожно-строительные материалы [Текст] / И. М. Грушко, И. В. Королев, И. М. Борщ, Г. М. Мищенко. – М.: Транспорт, 1983. – 383 с.
35. Лукашевич, В. И. Исследование процессов структурообразования асфальтобетонных смесей, приготовленных с использованием двухстадийной технологии [Текст] / В. И. Лукашевич // Изв. вузов. Строительство. – 2000. – № 2-3. – С. 25-31.
36. Соколов, Ю. В. Предложения по оптимизации состава дорожных асфальтобетонов [Текст] / Ю. В. Соколов. – Омск, 1981. – 33 с.
37. Рыбьев, И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ [Текст] / И. А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1978. – 307 с.
38. Соломатов, В. И. Элементы общей теории композиционных материалов [Текст] / В. И. Соломатов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1980. – №8. – С. 61-70.
39. Соломатов, В. И. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов [Текст] / В.И. Соломатов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – №4. – С. 56-60.
40. Хозин, В. Г. Усиление эпоксидных полимеров [Текст] / В. Г. Хозин. – Казань: Изд - во ПИК «Дом печати», 2004. – 446 с.
41. Хозин, В. Г. Анионоактивные битумные эмульсии для дорожных покрытий [Текст] / В. Г. Хозин, А. В. Мурафа, Д. Б. Макаров, М. А. Нуриев. – Астана, 2007. – С. 210-216.
42. Ворожейкин, В. Как ниточка с иголкой связаны свойства асфальтобетона и структура битумной пленки [Текст] / В. Ворожейкин // Автомобильные дороги. – 2003. – №7. – С. 18-20.
43. Горельшева, Л. А. Теоретические аспекты взаимодействия различных порошкообразных материалов с органическими вяжущими [Текст] / Л. А. Горельшева // Пути экономии материальных и энергетических ресурсов при ремонте и реконструкции автомобильных дорог. – М., 1989. – Вып. 1. – С. 29-35.
44. О стабильности битумов и взаимодействии их с минеральными материалами [Текст] / Лысихина А. И. и др. – М.: Дориздат, 1952. – 175 с.

45. Урьев, Ю. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы [Текст] / Н. Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 319 с.
46. Смирнов, В. М. Структура и механические свойства асфальтового бетона [Текст] / В. М. Смирнов // Труды ХАДИ. – Харьков, 1954. – Вып. 17. – С. 59-68.
47. Борщ, И. М. Минеральные порошки для асфальтовых материалов [Текст] / И. М. Борщ, Л. С. Терлецкая // Труды ХАДИ. – Харьков, 1961. – Вып. 26. – С. 29-33.
48. Горелышев, Н. В. Эксплуатационные свойства асфальтобетона [Текст]: Тез. докл. меж. гос. Ассоц. исслед. асфальтобетона 27.01.2000, – М.: МАДИ, 2000. – С. 13-15.
49. Котлярский, Э. В. Контактные взаимодействия при формировании асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения [Текст] / Э. В. Котлярский, В. П. Финашин, Н. Б. Урьев // Повышение качества строительства асфальтобетонных и черных покрытий. – М., Труды Союздорнии, 1987. – С. 46-49.
50. Горелышев, Н. В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы [Текст] / Н. В. Горелышев. – Можайск-Терра, 1995. – 176 с.
51. Гегель, В. Я. Управляемый контроль качества асфальтобетона на основе квалиметрии и радиометрии [Текст] / В. Я. Гегель // Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов: материалы докл. всесоюзной конференции. – Харьков, 1983 – С. 67-68.
52. Ладыгин Б. И. Прочность и долговечность асфальтобетона [Текст] / Б. И. Ладыгин, С. Л. Вдовиченко. – Мн.: Наука и техника. 1972. – С. 89-93.
53. Золотарев, В. А. О вкладе составляющих асфальтобетона в его прочность [Текст] / В. А. Золотарев // Повышение эффективности использования материалов при строительстве асфальтобетонных и черных покрытий: Труды Союздорнии. – М., 1989. – С.78-84.
54. Горелышев, Н. В. Новые принципы стандартизации асфальтобетона [Текст] / Н. В. Горелышев, Н. В. Быстров // Методы и средства повышения

надежности материалов и сооружений на автодорогах с учетом транспортных воздействий. – МАДИ (ТУ). 1996. – С. 155-156.

55. Колбановская, А. С. Дорожные битумы [Текст] / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – М.: Транспорт, 1973. – 261 с.

56. Руденская, И. М. Органические вяжущие для дорожного строительства [Текст] / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – М.: Транспорт, 1984, – 229 с.

57. Кучма, М. И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве [Текст] / М. И. Кучма. – М.: Транспорт, 1980. – 191 с.

58. Benesi, H. A. An infrared study of water-silicagel system [Text] / H. A. Benesi, A. C. Jones // J. Phys. Chem. – 1959. – Т. 63. – №2. – Р. 179-182.

59. Ребиндер, П. А. Вступительное слово [Текст] / П. А. Ребиндер // Материалы работ симпоз. по структуре и структурообразованию в асфальтобетоне. – Балашиха, 1968. – С. 5-9.

60. Котлярский, Э. В. Влияние количества высокодисперсного наполнителя и вязкости битума на структурно-механические свойства асфальтобетона [Текст] / Э. В. Котлярский // Дороги России XXI века. – 2002. – № 4. – С. 5-11.

61. Superpave performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing [Text] // Asphalt Institute Superpave Series. – 1997. – №1. – 84 p.

62. Волков, М. И. Исследования минеральных порошков для асфальтовых бетонов [Текст] / М. И. Волков, И. М. Борщ // Труды ХАДИ. – 1956. – Вып. 18. – С. 12-17.

63. Горельшев, Н. В. Взаимодействие битума и минерального порошка в асфальтовом бетоне [Текст] / Н. В. Горельшев // Труды ХАДИ. – 1955. – Вып. 16. – С. 10-23.

64. Дорожно-строительные материалы [Текст] / И. М. Грушко, И. В. Королев, И. М. Борщ, Г. М. Мищенко. – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.

65. Гохман, Л. М. О роли органических вяжущих материалов в обеспечении работоспособности асфальтобетона [Текст] / Л. М. Гохман // Автомобильные дороги. – 1987. – №3. – С. 19-20.

66. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур [Текст] / П. А. Ребиндер // Сб. ст. АН СССР. – М.: Наука, 1966. – С. 3-16.
67. Ребиндер, П. А. Поверхностно-активные вещества [Текст] / П. А. Ребиндер. – М.: Знание, 1961. – 46 с.
68. Лысихина, А. И. Поверхностно-активные добавки для повышения водостойчивости дорожных покрытий с применением битумов и дегтей [Текст] / А. И. Лысихина. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 232 с.
69. Колбановская, А. С. О подборе поверхностно-активных добавок, улучшающих сцепление битума с минеральными материалами [Текст] / А. С. Колбановская // Автомобильные дороги. – 1958. – №7. – С. 14-15.
70. Амброс, Р. А. Об исследовании влияния химических добавок на сцепление битума с каменными материалами [Текст] / Р. А. Амброс // Тр. Таллиннского политехнического инст. – Эстонгосиздат., 1956. – Серия А. – №69. – С. 74 - 77.
71. Органические вяжущие для дорожного строительства: учеб. пособие для вузов по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» [Текст] / С. К. Илиополов, И. В. Мардиросова, Е. В. Углова, О. К. Безродный. – М.: Изд-во Юг, 2003. – 428 с.
72. Колбановская, А. С. Метод красителей для определения сцепления битума с минеральными материалами [Текст] / А. С. Колбановская. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 63 с.
73. Королев, И. В. Строение и свойства граничных слоев битума на минеральном зерне [Текст] / И. В. Королев, Т. А. Ларина // Асфальтобетонные и черные облегченные покрытия автомобильных дорог: материалы Всероссийского совещания дорожников. – М.: Союздорнии, 1981. – С. 38-40.
74. Рыбьев, И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ [Текст] / И. А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 1978. – 310 с.
75. ТУ 5718-002-04000633-2006. «Смеси асфальтобетонные литые и литой асфальтобетон. Технические условия» [Текст]. – М., 2007.

76. Кирюхин, Г. Н. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Г. Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. – М.: ООО Изд. "Элит", 2009. – 176 с.

77. Splittmastixasphalt [Text] / Dr. Ing. K. H. Kolb, die Herren H. Erhard, F. Hoggenmuller, O. Kast und andere; LEITFADEN. Deutscher Asphaltverband (DAY). – 2000. – 27 p.

78. Броницкий, Е. Н. Использование щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси при капитальном ремонте участков автомобильной дороги Москва - Санкт - Петербург (км 29 - км 62, км 72 км - 85) [Текст] / Е. Н. Броницкий, Ю. А. Гуменюк, А. В. Комиков // Новости в дор. деле: Науч.-техн. информ. сб. – М., 2003. – Вып. 1. – С. 22-32.

79. Стебаков, А. П. Щебеночно-мастичный асфальтобетон – будущее дорожных покрытий [Текст] / А. П. Стебаков, Г. Н. Кирюхин, О. Б. Гопин // Строительная техника и технологии. – 2002. – №3. – С. 25-29.

80. Ульмгрен, Н. Зарубежный опыт применения щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (на примере шведского концерна NCC) [Текст] / Н. Ульмгрен, С. Дымов // Материалы и конструкции. Дорожная техника. – Санкт-Петербург: издательский дом «Славутич», 2003. – С. 22-31.

81. Задорожный, Д. В. ЩМА с повышенными эксплуатационными свойствами [Текст] / Д. В. Задорожный // Изд. РГСУ. – 2004. – №8. – С. 259.

82. Кирюхин, Г. Н. Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей [Текст] / Г. Н. Кирюхин, Е. А. Смирнов. – М., 2003. – 96 с.

83. Первые результаты внедрения щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей в России [Текст] / Росавтодор. Щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси в дорожном строительстве. Тематическая подборка. – М., 2004. – 80 с.

84. Будянская, Л. А. Щебеночно-мастичный асфальтобетон в условиях Западной Сибири: опыт применения [Текст] / Л. А. Будянская, Е. Ю. Махров, А. К. Эфа // Современные технологии устройства и содержания дорожного покрытия: материалы 4-й Международной научно-технической конференции. – Звенигород, 2004. – 324 с.

85. Эфа, А. К. Щебеночно-мастичный асфальтобетон. Теоретические основы, практика применения [Текст] / А. К. Эфа, А. В. Жураускас, А. П. Акулов, С. В. Галкин, Н. В. Осипов // Строительные материалы. – 2003. – № 1. – С. 22-23.
86. Смирнов, Е. А. Щебеночно-мастичный асфальтобетон [Текст] / Е. А. Смирнов // Автомобильные дороги. – 2001. – № 11. – С. 56-57.
87. GroBhans, D. Ursachen für Verformungen in Asphaltbefestigungen mit Splittmastixasphaltdeckschichten am Beispiel des Autobahnnetzes in Brandenburg [Text] / D. GroBhans, P. Pohlmann, H-R. Reuter // Bitumen. – 1998. – № 2. – P. 50-59.
88. Splittmastixasphalt mit Zusatz von synthetischen Fasern. Schumacher Gunter, Bullinger Ludvig, Lehdrich Jürgen Bitumen [Text]. – 2002. – №4. – P. 157-158.
89. Utilisation des fibres de verre en technique routière. Rai 11 at P., Chong G.Rev. gen. Roufies et acrodr [Text]. – 1998. – №768. – P. 122-124.
90. Huning, P. Bewahrung von Splittmastixasphalt [Text] / P. Huning // Asphalt (BRD). – 1977. – № 2. – P. 27–31.
91. Brawn, E. R. Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures in the United States [Text] / E. R. Brawn, J. E. Haddock, R. B. Mallick. – National Center for Asphalt Technology, 1997. – 32 p.
92. Wolterek, G. Erfahrungen mit Splittmastixasphalt auf Bayerischen Autobahnen [Text] / G. Wolterek // Bitumen. – 1997. – № 2. – P. 50-53.
93. Арутюнов, В. Г. Первый опыт строительства покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона в России [Текст] / В. Г. Арутюнов, Г. Н. Кирюхин, В. М. Юмашев // Дороги России XXI века. – 2002. – № 3. – С. 58-61.
94. Методические рекомендации по применению битумов разных марок в асфальтобетонных смесях различного гранулометрического состава [Текст] // Союздорнии. – М., 1981. – 15 с.
95. Кирюхин, Г. Н. Устройство слоев износа из горячих щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей [Текст] / Г. Н. Кирюхин, С. Ф. Балашов, М. Б. Сокальская. – М., 2001. – Юбилейн. вып. – С. 76-84.

96. Оев, А. М. Щебнемастичный асфальтобетон для тонкослойных покрытий [Текст] / А. М. Оев, Б. Б. Каримов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2006. – №2. – С. 24-25.

97. Пат. 2222559 Российская Федерация МПК⁷ С 08 L 95/00 Добавка для щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Джаназян Э. С., Шитиков Е. С., Ракитин Е. А., Григорян А. Р.; заявитель и патентообладатель Джаназян Э. С. – № 2002113710/03; заявл. 28.05.2002; опубл. 27.01.2004, Бюл. № 200614 – 3 с.

98. Пат. 2312116 Российская Федерация МПК С 08 L 95/00, С04В 26/26. Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси и способ ее получения. [Текст] / Нугманов О. К., Григорьева Н. П., Хлебников В. Н., Лебедев Н. А., Каримова А. Н.; заявитель и патентообладатель ООО «НПО «Нефтепромхим».; заявл. 24.11.2006; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 34 – 5 с.

99. Пат. 2312116 Российская Федерация МПК С 08 L 95/00, С 08 L 91/00, С08К 13/02. Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси и способ ее получения. [Текст] / Нугманов О. К., Григорьева Н. П., Лебедев Н. А., Мухаметханов А. М.; заявитель и патентообладатель ООО «НПО «Нефтепромхим».; заявл. 14.04.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23 – 6 с.

100. Пат. 2348662 Российская Федерация МПК С 08 L 1/02 Стабилизатор для щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Киселев М. А., Воронин А. Н., Веник В. Н., Эфа А. К., Базуев В. П.; заявитель и патентообладатель ООО «Фирма «ГБЦ», ООО «Строительная лаборатория» – № 2007107626/04; заявл. 10.09.2008; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 7 – 5 с.

101. Пат. 2348662 Российская Федерация МПК С 08 L 95/00. Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Джаназян Э. С., Мутафян К. С., Григорян А. Р.; заявитель и патентообладатель Джаназян Э. С.; заявл. 20.11.2005; опубл. 10.04.2006, Бюл. № 10 – 5 с.

102. Пат. 2479524 Российская Федерация МПК С 08 L 95/00, С04В 26/26. Стабилизирующая добавка для асфальтобетонной смеси на основе торфа (варианты) и способ получения для нее структурообразователя. [Текст] /

Кудряшов А. П., Кудряшов И. В., Кудряшов П. А., Гермашев В. Г., Ядыкина В. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Селена».; заявл. 29.06.2011; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11 – 11 с.

103. Пат. 2426704 Российская Федерация МПК C04B 26/26. Способ получения щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси с добавкой отсеков дробления известняков марки 400. [Текст] / Салихов М. Г., Вайнштейн В. М., Вайнштейн Е. В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет; заявл. 04.02.2009; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23 – 4 с.

104. Смирнов, Н. В. Опыт применения композиционных вяжущих БИТРЭК в дорожных асфальтобетонах [Текст] / Н. В. Смирнов // Дороги России XXI века. – 2004. – №2. – С. 92-96.

105. Илиополов С. К. Эффективный модификатор-стабилизатор для щебеночно-мастичных смесей [Текст] / С. К. Илиополов, И. В. Мардиросова // Автомобильные дороги. – 2005. – № 1. – С. 19-22.

106. Пат. 2266934 Российская Федерация, МПК⁷ C 04 L 95/00. Резиносодержащий полимерный модификатор битума [Текст] / Илиополов С. К., Мардиросова И. В., Щеглов А. Г., Чубенко Е. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Илиополов С. К., Мардиросова И. В., Щеглов А. Г., Чубенко Е. Н. и др. – № 2004124006/04; заявл. 05.08.2004; опубл. 27.12.2005 г.

107. Пат. 2476397 Российская Федерация МПК⁷ C 04 B 26/26. Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь и способ ее получения [Текст] / Соломенцев А. Б., Колодезный В. П., Старчак А.П., Баранов И.А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Орелдорстрой». - № 211120847/03; заявл. 25.05.2011; опубл. 27.02.2013 г.

108. Рекомендации по применению полимерно-дисперсного армирования асфальтобетонов с использованием резинового термоэластопласта (РТЭП) [Текст] // Росавтодор. – М., 2006. – 24 с.

109. Гезенцевей, Л. Б. Повышение качества битумоминеральных материалов из слабых известняков [Текст] / Л. Б. Гезенцевей, Н. В. Горелышев // Автомобильные дороги. – 1972. – №5. – С. 12-13.

110. Бадр Эль-Дин Атеф Мусса. Исследование известняков низкой прочности как материала для производства асфальтобетона [Текст]: дисс. канд. ... техн. наук: 05.23.05 / Бадр Эль-Дин Атеф Мусса. – М., 1992. – 222 с.

111. Щербаков, А. М. Свойства асфальтобетона из малопрочных известняков [Текст] / А. М. Щербаков, В. Г. Андриевский, В. В. Толмачева, С. В. Шадрова // Автомобильные дороги. – 1987. – №3. – С. 22-23.

112. Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов: тезисы докладов всесоюзной конференции [Текст]. – Харьков: Изд-во ХАДИ, 1983. – 192 с.

113. А. с. 1514736 СССР, МКН С 04 В 26/26. Асфальтобетонная смесь для дорожного строительства [Текст] / С. И. Самодуров, Г. А. Расстегаева, И. С. Зайцев, В. Ф. Дружинин, Л. Н. Расстегаева, В. А. Князев; опубл. 1989, Бюл. № 38. – 3 с.

114. Самодуров, С. И. Комплексное использование побочных продуктов и отходов металлургической промышленности в асфальтобетоне [Текст] / С. И. Самодуров, Г. А. Расстегаева, Л. Н. Расстегаева // Изв. вузов. Строительство. – 1994. – № 12. – С. 51-56.

115. А.с. №727662 СССР, МКН С 08 95/00. Асфальтобетонная смесь [Текст] / С. И. Самодуров, Г. А. Расстегаева, П. П. Баклан, В. А. Чепелева; опубл. 1980, Бюл. № 14. – 2 с.

116. А.с. №1014857 СССР, МКН С 08 35/00. Асфальтобетонная смесь [Текст] / С. И. Самодуров, Г. А. Расстегаева, И. М. Баранникова; опубл. 1983, Бюл. № 16. – 3 с.

117. А.с. 1000447 СССР, МКИ С 08 95/00. Асфальтобетонная смесь [Текст] / Г. А. Расстегаева, С. И. Самодуров, А. Г. Лепехин, И. Ф. Смурыгин; опубл. 1983, Бюл. №8. – 3 с.

118. А.с. №1390210 СССР, МКИ, С 04 В 26/26. Дегтебетонная смесь [Текст] / Г. А. Расстегаева, С. И. Самодуров, А. Б. Татарinov, Л. Н. Расстегаева, В. А. Князев; опубл. 1988, Бюл. № 15. – 3 с.

119. Самодуров, С. И. Гранулированные доменные шлаки и шлакопемзовые пески в дорожном строительстве [Текст] / С. И. Самодуров. – Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1975. – 234 с.

120. Братчун, В. И. Особенности структурообразования влажных дегтешлакобетонов [Текст] / В. И. Братчун, В. А. Золотарев, А. Н. Бачурин // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1991. – № 2. – С. 50-54.

121. Щербина, П. С. Использование шлакопемзового песка в асфальтобетоне [Текст] / П. С. Щербина, А. С. Пачернин, Ю. Е. Илларионов, Н. Г. Ехлакова // Автомобильные дороги. – 1982. – № 8. – С. 25-26.

122. Сухоруков, Ю. М. Теплоизоляционные материалы для дорожных одежд [Текст] / Ю. М. Сухоруков // Автомобильные дороги. – 1979. – № 3. – С. 18-19.

123. Салминен, Э. О. Применение керамзита в дорожном строительстве Финляндии [Текст] / Э. О. Салминен // Автомобильные дороги. – 1976. – № 12. – С. 28-29.

124. Сухоруков, Ю. М. Аглопорит – материал для дорожного строительства [Текст] / Ю. М. Сухоруков, Н. Г. Фридрих, В. М. Белоусов, И. И. Шевченко // Автомобильные дороги. – 1973. – № 11. – С. 12-13.

125. Седакова, М. Т. Конференция «Производство и применение перлита и перлитовых изделий в строительстве» [Текст] / М. Т. Седакова // Строительные материалы. – 1973. – № 10. – С. 37-38.

126. Седакова, М. Т. Вспученный перлит и изделия на его основе в ЧССР [Текст] / М. Т. Седакова // Строительные материалы. – 1977. – № 10. – С. 34-35.

127. Теплоизоляционные материалы из перлита на основе различных вяжущих [Текст]: Строительные материалы. – 1983. – № 3. – С. 24.

128. Инструкция по устройству теплоизоляции из битумоперлита для покрытий зданий под рулонную кровлю [Текст]. – Таллин: Трест Оргстрой, 1984. – 36 с.

129. Платаний, А. Н. Битумоперлит в комплексных плитах покрытий [Текст] / А. Н. Платаний, Б. В. Черняк, В. П. Харитонов // Строительные материалы. – 1973. – № 1. – С. 17.

130. Каменецкий, С. П. Перлитобитумная изоляция для кровельных покрытий повышенной сборности [Текст] / С. П. Каменецкий // Строительные материалы. – 1974. – № 4. – С. 14-15.

131. Шмелева, Л. А. Физико-химические превращения в битумоперлите и битуме в условиях эксплуатации [Текст] / Л. А. Шмелева // Строительные материалы. – 1984. – №4. – С. 23.

132. Коротаев, А. П. Повышение качества асфальтобетона за счет использования пористого минерального порошка [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Коротаев Александр Павлович. – Белгород, 2009. – 169 с.

133. Hettinger, M. L'asphalte aux granulats de synthèse [Text] / M. Hettinger // «Strasse und Verkehr». – 1979, 65. – № 12. – P. 454-456.

134. Кононов, В. Н. Асфальтовый бетон с применением искусственного щебня (дорсил) [Текст] / В. Н. Кононов, М. И. Клейман, А. С. Случ, К. А. Гиоев, Э. С. Файнберг, С. П. Чернова // Автомобильные дороги. – 1976. – № 3. – С. 22-23.

135. Грушо-Новицкая, А. О. Влияние дисперсности и количества отходов керамзита на эксплуатационные характеристики битума БН 90/10 [Текст] / А. О. Грушо-Новицкая, В. П. Ярцев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2003. – №5. – С. 28-31.

136. Аминов, Ш. Х. Использование пиритного огарка в качестве минерального наполнителя в асфальтобетонах [Текст] / Ш. Х. Аминов, И. Б. Струговец, Г. Г. Ханнанова, И. В. Недосеко, В. В. Бабков // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С.42-43.

137. Борисенко, Ю. Г. Битумно-минеральные композиции, модифицированные высокодисперсными отсевами дробления керамзита [Текст] /

Ю. Г. Борисенко, А. А. Солдатов, С. О. Яшин // Строительные материалы. – 2009. – № 1. – С. 62-63.

138. Borisenko, U. G. Bitumen Concretes modified by phosphogypsum [Text] / U. G. Borisenko, O. A. Borisenko, A. A. Soldatov, S. O. Yashin, E. V. Gordienko, S. O. Kazarian // International Scientific and Practical Conference (ISPC) London 3rd International Scientific and Practical Conference "Science and Society". – London 20-21 March 2013. – Vol.1. – P. 38-50.

139. Архитектура. Строительство. Инженерные системы: монография. Книга 2 [Текст] / А. С. Артемьева, О. А. Борисенко, Ю. Г. Борисенко и др. – Новосибирск; ООО «Агентство «СИБПРИНТ», 2012. – 181 с.

140. Борисенко, Ю. Г. Эксплуатационные свойства и технология легких кровельных асфальтобетонов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Борисенко Юрий Григорьевич. – Ставрополь, 1994. – 181 с.

141. Пат. РФ 2052607 С1 6 Е 04 D 7/00. Покрытие [Текст] / Печеный Б. Г., Борисенко Ю. Г., Пономаренко Г. Н.; опубл. 1996, Бюл. № 2, С. 208.

142. Методические рекомендации по устройству верхних слоев дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) [Текст] / ФГУП «Союздорнии». – М., 2002. – 36 с.

143. Куцына, Н. П. Щебеночно-мастичный асфальтобетон на основе техногенного сырья [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Куцына Наталья Петровна. – Белгород, 2007. – 154 с.

144. Сущенко Е. Ф., Кишук А. И. Пути рационального использования промышленных отходов в БССР [Текст]. – Мн.: БелНИИНТИ, 1978. – 54 с.

145. Erfahrungen Beim Anwenden von Textilschnitzeln aus Textilabfallen im Strassenbau [Text] / W. Weingart, P. Rottcher, H.-K-Techn. Konig. – 1986. – № 2. – P. 37-46.

146. City investigates different roadway repair methods. Robson John, Cohen Michail [Text] // Public Works. – 1984. – №4. – P. 70-71.

147. Пат. 2192400 Российская Федерация, МПК⁷ С 04 В 26/26, С 04 В 111:20, С 08 Б 95/00. Битумопесчаная мастика для тонких слоев покрытий [Текст]

/ Илиополов С. К., Котов В. Л., Задорожний Д. В., Мардиросова И. В. и др.; заявитель и патентообладатель Ростовский гос. строит, ун-т. – № 2001111485/03; заявл. 25.04.2001; опубл. 10.11.2002 г.

148. Калгин, Ю. И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов: монография [Текст] / Ю. И. Калгин. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. – 272 с.

149. Солдатов, А. А. Повышение сдвигоустойчивости и износостойкости дорожных покрытий при использовании высокодисперсных отсеков дробления керамзита в асфальтобетонных смесях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Солдатов Алексей Александрович. – Воронеж, 2011. – 162 с.

150. Высоцкая, М. А. Особенности структурообразования битумо-минеральных композиций с применением пористого сырья [Текст] / М. А. Высоцкая, Д. К. Кузнецов, Д. Е. Барабаш // Строительные материалы. – 2014. – № 1-2. – С. 68–71.

151. Высоцкая, М. А. Оценка качества битумоминеральных композитов с применением пористых наполнителей [Текст] / М. А. Высоцкая, Д. К. Кузнецов, М. Ю. Федоров // Дороги и мосты. – 2012. – № 27. – С. 241–250.

152. Фролов, Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы [Текст]: учебник для вузов / Ю. Г. Фролов. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. – 464 с.

153. Писаренко, А. П. Курс коллоидной химии [Текст] / А. П. Писаренко, К. А. Поспелова, А. Г. Яковлев. – М. : Высшая школа, 1961. – 242 с.

154. Гельфман, М. И. Коллоидная химия [Текст] / М. И. Гельфман, О. В. Ковалевич, В. П. Юстратов. – СПб. : Издательство «Лань», 2003. – 336 с.

155. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров [Текст] / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – М.: Химия, 1969. – 320 с.

156. Адам, Н. К. Физика и химия поверхностей [Текст] / Н. К. Адам. – М.: Гостехиздат, 1947. – 264 с.

157. Bueche, F. Debye P. [Text] / F. Bueche, W.M. Cashin // Chem. Phys. – 1955. – № 20. – P. 27-32.

158. Атоян, С. М. Асфальтобетон из ракушечных известняков / С. М. Атоян. – М.: Транспорт, 1977. – 134 с.
159. Железко, Т. В. Структура и свойства асфальтовяжущих [Текст] / Т. В. Железко, Е. П. Железко // Изв. Вузов. Строительство. – 1997. – № 3. – С. 35-42.
160. Рыбьев, Т. Г. Влияние кристаллохимических особенностей минеральных порошков на структурно-механические свойства битумоминеральных материалов [Текст] / Т. Г. Рыбьев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1960. – № 3. – С. 90-99.
161. Бужевич, Г. А. Керамзитожелезобетон [Текст] / Г. А. Бужевич, Н. А. Корнев. – М. : Гос. Изд. литер. По строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 236 с.
162. Соломатов, В. И. Технология полимербетонов и армополимербетонных изделий [Текст] / В. И. Соломатов. – М.: Стройиздат, 1984. – 141 с.
163. Соломатов, В. И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов [Текст] / В. И. Соломатов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – №8. – С. 58-64.
164. Соломатов, В. И. Полимерные композиционные материалы в строительстве [Текст] / В. И. Соломатов, А. Н. Бобрышев, К. Г. Химмлер. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.
165. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии [Текст]: учебник. В 2 кн. / под ред. В. Г. Айнштейна. – М.: Логос; Высшая школа, 2002. – Кн. 2. – 872 с.
166. Горнаев, Н. В. Взаимодействие битума с влажными минеральными материалами. [Текст] / Н. В. Горнаев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1967. – №12. – С. 137-139.
167. Pilat, J. Mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem mialu gumowego i wapna hydratyzowanego [Text] / J. Pilat, M. Kalabinska, P. Radziszewski // Materiały Budowlane. – 2000. – № 11. – 149 p.
168. Королев, И. В. Пути экономии битума в дорожном строительстве [Текст] / И. В. Королев. – М.: Транспорт, 1986. – 149 с.

169. Басман, В. Е. Адгезионная прочность [Текст] / В. Е. Басман. – М.: Химия, 1981. – 208 с.
170. Соломатов, В. И. Пути активации наполнителей композиционных строительных материалов [Текст] / В. И. Соломатов, Л. И. Дворкин // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1987. – №1. – С. 60-63.
171. Костин, В. И. Щебеночно-мастичный асфальтобетон для дорожных покрытий [Текст] / В. И. Костин. – Н. Новгород.: ННГАСУ, 2009. – 66 с.
172. Ковалев, Н. С. Исследование морозостойкости и трещиностойкости асфальтобетонных покрытий из шлаковых материалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ковалев Николай Сергеевич. – Воронеж, 1979. – 277 с.
173. Батаев, В. А. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей [Текст] / В. А. Батаев, А. А. Батаев, А. П. Алхимов. – М. : Флинта: Наука, 2007. – 224 с.
174. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений СН 509-78. [Текст] – М.: Стройиздат, 1979. – 66 с.
175. Отраслевые методические указания по определению экономической эффективности использования в дорожном строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. [Текст] – М.: Стройиздат, 1989. – 76 с.
176. ZTV Asphalt-StB 01: Zusatzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien fur den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt (2001) [Text], FGSV Nr. 799.
177. Силкин, В. В. Асфальтобетонные заводы [Текст] / В. В. Силкин, А. П. Лупанов. – М.: Экон-Информ, 2008. – 266 с.

Приложение А

Директор ООО «ДЖУЛИ»

г. Ставрополя

А.К. Умаров

21.07. 2014 г.



СПРАВКА

о фактических показателях внедрения горячих щебеночно-мастичных асфальтобетонов, модифицированных керамзитовым порошком

Настоящая справка составлена 21 июля 2014 года в том, что в соответствии с договором на создание научно-технической продукции между СКФУ и ООО «ДЖУЛИ» г. Ставрополя в результате внедрения в 2013 году в производство щебеночно-мастичных асфальтобетонов модифицированных стабилизирующей добавкой на основе керамзитового порошка, было произведено строительство покрытий из этих композиции на автомобильной дороге в г. Ставрополе по пр. Кулакова, 34А автосервис между торгово-офисными помещениями площадью 1050 м² в объеме 105 тонн. Процентное соотношение содержания керамзитового порошка в смеси 2,5 % сверх массы минеральной части.

Покрытие после года эксплуатации находится в хорошем состоянии, без признаков разрушения. Экономический эффект от производства и укладки предложенных асфальтобетонных композиций по сравнению с традиционными щебеночно-мастичными асфальтобетонами составил на 100 м² покрытия – 1707 руб.

Инженер ПТО

ООО «ДЖУЛИ» г. Ставрополя

А.А. Богданов

«21» июля 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВПО «Северо-
Кавказский федеральный
университет», доктор
технических наук, профессор



И.А. Евдокимов

«*октябрь*» 201*5* г.

Акт о внедрении

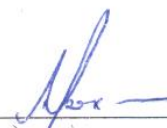
результатов диссертационного исследования Казаряна С.О. на тему:
«Щебеночно-мастичные асфальтобетоны, модифицированные пористыми
порошковыми материалами» в учебный процесс ФГАОУ ВПО
«Северо-Кавказский федеральный университет».

Комиссия в составе: председатель - директор ИСТИМ, д-р техн. наук, доц. Брачихин А.А., членов комиссии - заместителя директора по учебной работе, канд. техн. наук, доцента Порохни А.А.; заведующий кафедрой строительства, канд. техн. наук, доцента Рожкова П.В., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования Казаряна С.О. на тему: «Щебеночно-мастичные асфальтобетоны, модифицированные пористыми порошковыми материалами» были успешно апробированы в учебном процессе кафедры строительства при проведении лекционных и семинарских занятий по общепрофессиональной дисциплинам «Дорожно-строительные материалы и конструкции» для направления подготовки 08.03.01 Строительство (профиль «Автомобильные дороги»), «Строительные материалы» для направления подготовки 08.03.01 Строительство («Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство»), «Покрытия и кровли» для специальности 270102.65.

Научные статьи по теме диссертации включены в качестве рекомендуемых источников в учебно-методические пособия по дисциплине

«Дорожно-строительные материалы и конструкции», «Строительные материалы», «Покрытия и кровли».


Председатель комиссии:
Порохня Андрей Алексеевич,
канд. техн. наук, доцент,
Институт строительства, транспорта и
машиностроения, зам. директора по УР


(Подпись)

Скориков Савва Викторович
канд. техн. наук, доцент,
Институт строительства, транспорта и
машиностроения, зам. директора по НР


(Подпись)

Рожков Петр Васильевич,
канд. техн. наук, доцент,
Институт строительства, транспорта и
машиностроения, заведующий
кафедрой строительства


(Подпись)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2603310

ДОРОЖНАЯ ОДЕЖДА

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северо-Кавказский федеральный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № **2015138180**
Приоритет изобретения **25 мая 2015 г.**
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **01 ноября 2016 г.**
Срок действия патента истекает **07 сентября 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивалиев**



Автор(ы): *Борисенко Юрий Григорьевич (RU), Казарян Самвел
Оганесович (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11) **2 603 310** (13) **C1**(51) МПК
E01C 7/18 (2006.01)
C04B 26/26 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015138180/03, 07.09.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.09.2015

Приоритет(ы):

(23) Дата поступления дополнительных материалов
к ранее поданной заявке: 25.05.2015,
2014122873 04.06.2014

(45) Опубликовано: 27.11.2016 Бюл. № 33

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: Технологии производства и
применения антигололедных щебеночно-
мастичных асфальтобетонов для покрытий
лесовозных дорог, Веюков Е.В. и Салихов
М.Г., Фундаментальные исследования, 2012,
№11-4, стр.917-921; Повышение
сдвигоустойчивости и износостойкости
дорожных покрытий при использовании
высокодисперсных отсеков дробления
керамзита в асфальтобетонных (см. прод.)Адрес для переписки:
355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Северо-
Кавказский федеральный университет

(72) Автор(ы):

Борисенко Юрий Григорьевич (RU),
Казарян Самвел Оганесович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Северо-Кавказский
федеральный университет" (RU)

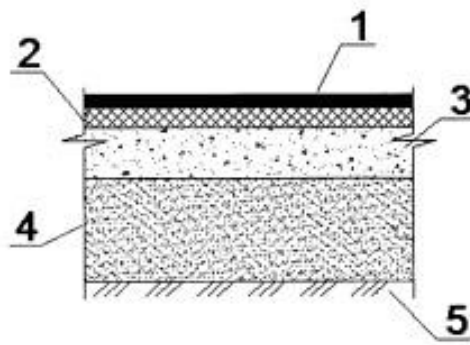
(54) ДОРОЖНАЯ ОДЕЖДА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области
строительства и может применяться при
устройстве покрытий дорожных одежд
автомобильных дорог. Технический результат:
снижение толщины слоев дорожной одежды,
повышение прочности, сдвигоустойчивости,
трещиностойкости и снижение стекаемости
ЩМА-смеси. Дорожная одежда включает
основание - подстилающий слой, слойуплотненного песка, уплотненного щебня и слой
горячего крупнозернистого пористого
асфальтобетона, на котором размещено покрытие
из щебеночно-мастичного асфальтобетона. В
качестве материала покрытия используется
щебеночно-мастичный асфальтобетон с
добавлением высокодисперсных отсеков
дробления керамзита толщиной 40 мм. 2 табл., 1
ил.

RU 2 603 310 C1

RU 2 603 310 C1



Фиг.1

(56) (продолжение):

смесь, Солдатов А.А., автореферат, Воронеж, 2011; RU 2010121257 А, 27.11.2011; RU 2506238 С1, 10.02.2014.

RU 2603310 C1

RU 2603310 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY(19) **RU** (11) **2 603 310** (13) **C1**(51) Int. Cl.
E01C 7/18 (2006.01)
C04B 26/26 (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2015138180/03, 07.09.2015

(24) Effective date for property rights:
07.09.2015

Priority:

(23) Date of filing the supplementary materials of the
earlier submitted application: 25.05.2015,
2014122873 04.06.2014

(45) Date of publication: 27.11.2016 Bull. № 33

Mail address:

355009, g. Stavropol, ul. Pushkina, 1, Severo-
Kavkazskij federalnyj universitet

(72) Inventor(s):

Borisenko Jurij Grigorevich (RU),
Kazarjan Samvel Oganesevich (RU)

(73) Proprietor(s):

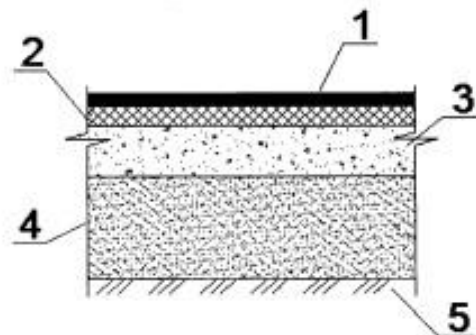
federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Severo-Kavkazskij federalnyj
universitet" (RU)(54) **ROAD PAVEMENT**

(57) Abstract:

FIELD: construction.

SUBSTANCE: invention relates to construction and
can be used in pavement of automobile roads. Pavement
includes a base - underlayer, layer of compacted sand,
compacted crushed stone and a layer of hot coarse
porous asphalt concrete, on which there is a coating of
macadam-mastic asphalt concrete. Coating material
used is macadam-mastic asphalt concrete with addition
of fine grinding screenings of expanded clay with
thickness of 40 mm.EFFECT: reduced thickness of layers of road
pavement, high strength, shear resistance, crack
resistance and reduced flow of macadam-mastic
mixture.

1 cl, 2 tbl, 1 dwg



Фиг. 1

RU 2 603 310 C1

RU 2 603 310 C1

RU 2 603 310 C1

Изобретение относится к области строительства и может применяться при устройстве покрытий дорожных одежд автомобильных дорог, автостоянок, аэродромов, мостовых переходов, тротуаров.

Известна конструкция дорожной одежды, включающая: основание, выполненное из щебня и высокопористого асфальтобетона, и двухслойное асфальтобетонное покрытие с толщиной нижнего слоя 50 мм и верхнего слоя 40 мм (Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцев, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королёв под ред. Л.Б. Гезенцева. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт, 1985. - С. 292).

Недостатком этой конструкции является значительная толщина слоев покрытия.

Известна стандартная конструкция дорожной одежды с использованием щебеночно-мастичных асфальтобетонов (ЩМА), включающая покрытие из слоя ЩМА (50-60 мм), основание из пористого асфальтобетона, уплотненного щебня, песка и подстилающего слоя (ГОСТ 31015-2002. - М.: 2002. - 22 с.). Недостатками материала покрытия являются невысокие сдвигоустойчивость и трещиностойкость, значительная толщина слоя покрытия, повышенное стекание битума из ЩМА-смеси.

В качестве прототипа принята конструкция дорожной одежды, состоящая из покрытия - слой ЩМА толщиной 50 мм, основания - пористый крупнозернистый асфальтобетон (70 мм), слой уплотненного щебня (300 мм), мелкий песок (360 мм) и подстилающий слой. В покрытии используется ЩМА следующего состава, мас. %:

- дорожный нефтяной битум - 6,0; щебень фракции 5,0-20,0 мм - 77; песок из отсевов дробления щебня 0,16-5,0 - 11,6; известняковый минеральный порошок - 10,8
- стабилизирующая добавка - 0,4; смесь кристаллических солей - 0,6 (Веюков Е.В., Салихов М.Г. Технологии производства и применения антигололедных щебеночно-мастичных асфальтобетонов для покрытий лесовозных дорог. // Фундаментальные исследования. - 2012. - №11. - С. 917-921).

Недостатками данной конструкции являются недостаточно высокая прочность, повышенная стоимость в сравнении со стандартными ЩМА.

Технический результат изобретения заключается в снижении толщины конструктивных слоев дорожной одежды, повышении прочности, сдвигоустойчивости, трещиностойкости, снижении стекаемости ЩМА-смеси и стоимости дорожного покрытия.

Указанный технический результат достигается тем, что в качестве конструкционного слоя покрытия используется модифицированная высокодисперсными отсевами дробления керамзита щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, в состав которой входят, мас. %:

- заполнитель: щебень фракции 5,0-20,0 мм - 61,0-61,5;
- песок из отсевов дробления щебня 0,16-5,0 мм - 15,0-15,5;
- наполнитель: известняковый минеральный порошок - 14,5-16,0;
- высокодисперсные отсевы дробления керамзита - 1,9-2,4;
- дорожный нефтяной битум - 6,1.

Конструкция дорожной одежды представлена на фиг. 1. Дорожная одежда состоит из асфальтобетонного покрытия, основания и подстилающего слоя. Покрытие состоит из слоя предложенного ЩМА (1) - 40 мм; основание включает слой горячего крупнозернистого пористого асфальтобетона (2) - 70 мм, слой уплотненного щебня (3) - 300 мм, уплотненного песка (4) - 360 мм; подстилающий слой (5).

Новым является то, что в качестве стабилизирующей добавки в слое ЩМА применяются высокодисперсные отсевы дробления керамзита, что позволяет значительно снизить стекание битума из смеси, повысить прочностные характеристики, сдвигоустойчивость, трещиностойкость дорожного покрытия и снизить толщину

RU 2 603 310 C1

покрытия. Применение высокодисперсных отсевов дробления керамзита в смеси позволяет снизить стоимость ЩМА и, следовательно, всей конструкции в целом.

Пример. Были приготовлены составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС) (табл. 1). ЩМАС приготавливалась следующим образом: битум и минеральный наполнитель разогревались до температуры $170 \pm 2^\circ\text{C}$, затем добавлялись минеральный порошок и стабилизирующая добавка (высокдисперсные отсевы дробления керамзита); затем все компоненты смешивались в лабораторном смесителе до получения однородной массы. ЩМА смесь уплотнялась при давлении 40 МПа в течение 3 минут в цилиндрических металлических формах (размеры образцов-цилиндров 71,4x71,4 мм). Определение показателей физико-механических свойств и сдвигустойчивости проводили согласно ГОСТ 12801-98. Результаты испытаний ЩМА представлены в табл. 2.

Согласно табл. 1 и 2, содержание битума принято в пределах 6,0-6,3 мас. %. При содержании битума в смеси более 6,1 мас. %, например 6,2-6,3 мас. % (составы 3, 4) снижаются прочностные показатели, сдвигустойчивость (табл. 2). При содержании битума в смеси менее 6,1 мас. %, например, 6,0 мас. % (состав 1), снижаются прочностные показатели.

Содержание отсевов дробления керамзита было принято оптимальным, в пределах 2,4 мас. %. При увеличении содержания отсевов дробления керамзита повышается битумоемкость, а также жесткость смеси. При снижении содержания отсевов дробления керамзита в составах ЩМА, например 1,9 мас. % (состав 5), повышается стекаемость битума в смеси.

Из сравнения качества предлагаемых композиций (составы 2,5-9) с прототипом (состав 10) (табл. 2) выявлены повышенные прочность, теплостойкость, трещиностойкость и сдвигустойчивость предложенного ЩМА. Показатель стекания вяжущего (состав 9) достаточно высокий и не уступает прототипу.

Процесс укладки и уплотнения дорожной одежды не отличается от устройства покрытий из традиционных щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

Таблица 1

30	Компоненты	Содержание, мас. %									Прототип
		Предлагаемые композиции									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Битум марки БНД 60/90	6,0	6,1	6,2	6,3	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	5,6
35	Щебень фракции 20,0 - 5,0 мм	61,0	61,0	61,0	61,0	61,0	61,2	61,3	61,4	61,5	72,5
	Песок из отсевов дробления 5,0 - 0,16 мм	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,2	15,3	15,4	15,5	11,0
40	Известняковый минеральный порошок фракции менее 0,16 мм	15,6	15,5	15,4	15,3	16,0	15,4	15,1	14,8	14,5	10,0
	Отсевы дробления керамзита фракции менее 0,16 мм	2,4	2,4	2,4	2,4	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	-
	Стабилизирующая добавка Viator-66	-									0,4
45	Смесь кристаллических солей NaCl и CaCl ₂	-									0,5

RU 2 603 310 C1

Таблица 2

Показатель	Физико-механические свойства композиций									
	Результаты испытаний предлагаемых композиций									Прототип
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Прочность на сжатие при 20 °С, R ₂₀ , МПа	3,97	4,2	3,68	3,59	4,1	4,18	4,36	4,5	4,6	4,4
Прочность на сжатие при 50 °С, R ₅₀ , МПа	1,34	1,8	1,65	1,36	1,6	1,67	1,8	1,4	1,9	1,0
Водонасыщение, W, %	1,54	1,85	1,75	1,7	1,62	1,7	1,76	1,9	1,82	2,2
Трещиностойкость — предел прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С, R _т , МПа, не менее:	5,6	6,24	5,8	5,7	5,9	6,1	6,2	6,24	6,28	3,5
Водостойкость при длительном водонасыщении, K _{вд} , не менее	0,76	0,76	0,77	0,8	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,87
Сдвигоустойчивость: коэффициент внутреннего трения, tgφ не менее	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,94
сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, C _т , МПа, не менее	0,22	0,27	0,24	0,21	0,22	0,24	0,24	0,27	0,3	0,19
Показатель стекания вяжущего, В, %, не более:	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,17	0,14	0,13	0,11	0,1-0,15

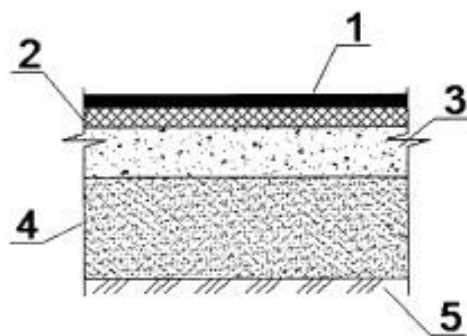
Формула изобретения

Дорожная одежда, включающая основание - подстилающий слой, слой уплотненного песка, уплотненного щебня и слой горячего крупнозернистого пористого асфальтобетона, на котором размещено покрытие из щебеночно-мастичного асфальтобетона, отличающаяся тем, что в качестве материала покрытия используется щебеночно-мастичный асфальтобетон с добавлением высокодисперсных отсеков дробления керамзита толщиной 40 мм при следующем соотношении компонентов, мас. %:

щебень фракции 5,0-20,0 мм	61,0-61,5
песок из отсеков дробления 0,16-5,0 мм	15,0-15,5
известняковый минеральный порошок	14,5-16,0
высокодисперсные отсеки дробления керамзита	1,9-2,4
дорожный нефтяной битум	6,1

RU 2 603 310 C1

ДОРОЖНАЯ ОДЕЖДА



Фиг.1