

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



До Чонг Тоан

**САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЙСЯ АСФАЛЬТОБЕТОН С  
КАПСУЛИРОВАННЫМ ПОЛИМЕРНЫМ МОДИФИКАТОРОМ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Иноземцев Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

Москва — 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА .....	14
1.1 Современные дорожно-строительные материалы на основе битума .....	14
1.1.1 Структура и свойства асфальтобетона.....	21
1.1.2 Особенности эксплуатации асфальтобетона.....	31
1.2 Методики оценки долговечности асфальтобетонов и технологии восстановления эксплуатационных свойств .....	33
1.3 Теоретические предпосылки самовосстановления в асфальтобетоне .....	55
1.4 Цель, задачи и научная гипотеза диссертационного исследования.....	60
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	62
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	64
2.1 Применяемые материалы и их характеристики .....	64
2.2 Методы получения, исследования и испытания материалов.....	69
2.2.1 Методика синтеза и исследования капсулированного модификатора.....	74
2.2.2 Методика оценки самовосстанавливающей способности асфальтобетона.....	79
2.2.2.1 Методика оценки собственного потенциала самовосстановления асфальтобетона.....	79
2.2.2.2 Методика оценки самовосстановления асфальтобетона .....	81
2.3 Математические методы планирования эксперимента и анализа результатов исследования.....	84
2.3.1 Системный анализ: декомпозиция системы критериев качества, выявление управляющих рецептурных и технологических факторов, алгоритм синтеза материала .....	84
2.3.2 Статистический анализ экспериментальных данных.....	98

2.3.3	Многокритериальная оптимизация .....	100
ГЛАВА 3.	ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА И СВОЙСТВА КАПСУЛИРОВАННОГО МОДИФИКАТОРА .....	103
3.1	Выбор восстанавливающего агента капсулированного модификатора для самовосстанавливающегося асфальтобетона .....	103
3.2	Технологические свойства смесей для синтеза капсулированного модификатора .....	109
3.3	Свойства капсулированного модификатора .....	123
	ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	137
ГЛАВА 4.	ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА И СВОЙСТВА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА С КАПСУЛИРОВАННЫМ ПОЛИМЕРНЫМ МОДИФИКАТОРОМ .....	139
4.1	Способность асфальтобетона к самовосстановлению .....	139
4.2	Модель функционирования капсулированного модификатора в асфальтобетонной смеси .....	150
4.3	Структура и свойства самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором .....	158
	ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	183
ГЛАВА 5.	ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА.....	185
5.1	Принципиальная технологическая схема производства капсулированного модификатора .....	185
5.2	Принципиальная технологическая схема производства смеси самовосстанавливающегося асфальтобетона .....	186
5.3	Технико-экономическая эффективность .....	192

5.4 Промышленное внедрение самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором .....	195
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....	199
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	200
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	204
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	205
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	206
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	227

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

В мировой практике одной из актуальных тематик проводимых исследований является поиск решений, направленных на увеличение периода эксплуатации изделия или конструкции. Техничко-экономическая эффективность строительных материалов как правило возрастает с расширением области их применения и снижением затрат на обеспечение требуемого качества изделий в эксплуатационный период.

Перспективным решением в области материаловедения, направленным на увеличение срока службы конструкций, является создание «умных» материалов (smart materials), способных в процессе эксплуатации в требуемом направлении изменять свойства. Ключевым условием классификации материала как «умного» является обеспечение контролируемых изменений параметров структуры и свойств, которые задаются на стадии проектирования материала. Для дорожного строительства перспективным классом умных материалов являются материалы, обладающие способностью восстанавливать эксплуатационные свойства (функциональность) до значений, близких к начальным. Указанное принято называть «самовосстановлением» или «самозалечиванием» (self-healing).

В настоящее время реализация самовосстановления в технологиях строительных и дорожных материалов заключается в создании капсул-контейнеров, в которых располагается активный компонент, извлечение которого вследствие разрушения капсулы приводит к стягиванию берегов трещин и торможению их развития; в благоприятных условиях происходит восстановление сплошности материала. Эффект от самовосстановления во многом зависит от концентрации и свойств капсул, а также свойств активного компонента – восстанавливающий агент. В настоящее время не существует единой методологии контроля способности материала к самовосстановлению. Это обусловлено отсутствием критериев, характеризующих эффективность

применяемого способа консервативного самовосстановления, реализуемого посредством введения капсул, содержащих восстанавливающий компонент, в материал. При этом как материал, из которого изготавливаются капсулы, так и активный компонент должны соответствовать определённым требованиям, а общее количество активного компонента должно обеспечивать восстановление материала за заданный период его эксплуатации.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках: проекта № 19-79-00262 и проекта № 22-79-10051.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Реализация технологии самовосстановления в асфальтобетоне сопряжено с его структурными особенностями и термопластичными свойствами. Учитывая особенности свойств битума, увеличение прочностных характеристик асфальтобетона, установленных нормативными документами, не обеспечивает его долговечность в эксплуатационных условиях. Поэтому обеспечение баланса между максимальной прочностью при положительных температурах, с минимальной хрупкостью будет одним из условий обеспечения долговечности.

Получаемые различными методами капсулы могут иметь размеры от 10 мкм до 3 мм, в которых в качестве капсулированного модификатора используются преимущественно растительные масла подсолнечника. Альтернативным вариантом восстанавливающего агента является промышленный восстановитель (rejuvenator), который представляет собой смесь низкомолекулярных соединений и масел. Механизм действия такого восстанавливающего агента в асфальтобетоне сводится к растворению в нем состаренных в процессе эксплуатации компонентов битума и локального снижения хрупкости.

К капсулам, содержащим восстанавливающий агент, так же предъявляются требования по термостойкости и прочности скорлуп, необходимой для сохранения

целостности на этапе уплотнения асфальтобетонной смеси, а использование карбонатопроизводящих бактерии, как модификатора не возможно, так как они не выживут при температурах приготовления асфальтобетонной смеси от 140 до 185 °С.

Получаемые с помощью различных технологий капсулы отличаются как размерами, так и физико-механическими свойствами, которые должны удовлетворять требованиям по прочности, обеспечивающей их целостность во время приготовления асфальтобетонной смеси и ее уплотнении. Качество технологии самовосстановления складывается из технологических свойства капсул и восстанавливающих свойств инкапсулированного агента. В настоящий момент не существует единой методологии контроля способности материала к самовосстановлению. Это обусловлено отсутствием критериев, характеризующих способность материала контролируемым образом самостоятельно реагировать на условия и предпринимать меры по ликвидации неблагоприятного эффекта для свойств или структуры материала.

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованного технологического решения получения асфальтобетона, обладающего свойством самовосстановления за счет использования капсулированного полимерного модификатора.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

– научно обосновать выбор компонентов, состав и технологию изготовления капсулированного модификатора для получения самовосстанавливающегося асфальтобетона;

– исследовать процессы структурообразования и свойства разрабатываемого капсулированного модификатора и самовосстанавливающегося асфальтобетона с его применением;

- установить закономерности влияния основных рецептурно-технологических факторов на физико-механические и эксплуатационные свойства самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором;
- разработать составы и технологические режимы изготовления самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором;
- провести оценку технико-экономической эффективности самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором.

### **Научная новизна работы.**

Научно обосновано и экспериментально подтверждена эффективность технологического решения по получению асфальтобетона, обладающего свойством самовосстановления, посредством объёмного распределения капсул полимерного модификатора, содержащего в качестве восстанавливающего агента тиолсодержащий уретановый полимер, а в качестве материала капсулы-контейнера – альгинат кальция.

Установлено, что свойства восстанавливающего агента (тиолсодержащий уретановый полимер) не оказывают влияния на свойства капсул из альгината кальция, обеспечивая получение капсул диаметром  $1,35 \pm 0,02$  мм и содержанием восстанавливающего агента не менее  $83 \pm 0,5$  %. Показано, что капсулы, обладающие максимальной прочностью и максимальным содержанием восстанавливающего агента, получают из эмульсии, содержащей 2,5 % альгината натрия при соотношении восстанавливающий агент: альгинат натрия =  $5,0 \pm 0,2$ .

Доказано, что тиолсодержащий уретановый полимер совместно с активатором (смесь серы, оксида марганца (IV) и тетраметилтиурамдисульфида в соотношении 6,1 : 3,7 : 1,0) в количестве 3,5 % от массы битума обеспечивает восстановление прочности асфальтобетона, подвергнутого разрушению, на 46 % от начальной проч-



ности. Показано, что эффект самовосстановление возрастает с увеличением количества ароматических соединений в мальтеновой части битума.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Получены новые данные, расширяющие представления о синтезе модификаторов методом капсулирования с применением эмульсий из альганата натрия, а также данные, расширяющие представления о структурообразовании асфальтобетонов со свойством самовосстановления, дополняющие теорию строительных композиционных материалов.

Оптимизированы составы и режимы синтеза капсулированного полимерного модификатора и изготовления самовосстанавливающегося асфальтобетона с его применением.

Разработан состав капсулированного полимерного модификатора, обладающего следующими свойствами: диаметр –  $1,35 \pm 0,02$  мм; содержание восстанавливающего агента –  $83 \pm 0,5$  %; прочность – 18 Н; термостойкость – до 150 °С.

Предложена методика определения свойств, характеризующих эффективность процесса самовосстановления по показателю потери прочности, учитывающего собственный потенциал самовосстановления и остаточную прочность, скорости процесса самовосстановления и стойкости материала после процесса самовосстановления.

Разработаны составы самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором, обладающего следующими свойствами: остаточная пористость – 1,8 %; водонасыщение – 1,3 %; предел прочности при расколе при 0 °С – 3,1 МПа; предел прочности при сжатии при 20°С – 3,6 МПа; предел прочности при сжатии при 50°С – 1,2 МПа; коэффициент внутреннего трения – 0,93; сцепление при сдвиге – 0,44; коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении по ГОСТ 12801-98 – 0,90; коэффициент самовосстановления – 1,93; коэффициент скорости самовосстановления – 1,76; коэффициент выхода из строя – 1,70.

### **Методология и методы исследования.**

Методология научно-квалификационной работы основывается на разработках отечественных и зарубежных исследователей в области строительного материаловедения, системного анализа, дорожных строительных материалов. Информационно-теоретическую базу исследования составляют информация по сформулированной научно-технической задаче отраженная в статьях в периодических российских и иностранных изданиях, сборниках научных конференций, монографиях, а также объекты интеллектуальной собственности. Работа выполнена с применением системно-структурного подхода строительного материаловедения. При проведении исследований использовались физико-химические методы определения параметров структуры и свойств, методы регрессионного и корреляционного анализа и статистической обработки экспериментальных данных.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование применение тиолсодержащего уретанового полимера в качестве восстанавливающего агента в виде капсулированного модификатора с кальций альгинатной оболочкой для получения асфальтобетона, обладающего свойством самовосстановления;

2. Результаты исследования особенностей синтеза и свойств капсулированного модификатора диаметром  $1,35 \pm 0,02$  мм, прочностью 18 Н, термостойкостью до  $150$  °С с тиолсодержащим уретановым полимером в качестве восстанавливающего агента не менее  $83 \pm 0,5$  % от объема контейнера.

3. Состав и режим изготовления капсулированного полимерного модификатора, с максимальной прочностью и максимальным содержанием восстанавливающего агента, с помощью эмульсий, содержащих 2,5 % альгината натрия и соотношении восстанавливающий агент : альгинат натрия =  $5,0 \pm 0,2$ .

4. Результаты исследования процессов структурообразования самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором и влияния основ-

ных рецептурных и технологических факторов на физико-механические и эксплуатационные свойства самовосстанавливающегося асфальтобетона.

5. Состав и режимы изготовления асфальтобетонной смеси с капсулированным полимерным модификатором (тиолсодержащий уретановый полимер) совместно с активатором (смесь серы, оксида марганца (IV) и тетраметилтиурамдисульфида в соотношении 6,1 : 3,7 : 1,0) и асфальтобетона, обладающего свойством самовосстановления.

6. Данные, расширяющие представления о синтезе модификаторов методом капсулирования с применением эмульсий из альгината натрия, а также данные, расширяющие представления о структурообразовании асфальтобетонов со свойством самовосстановления, дополняющие теорию строительных композиционных материалов.

7. Система показателей качества для оценки свойств асфальтобетона, характеризующих эффективность процесса самовосстановления по показателю потери прочности, учитывающего собственный потенциал самовосстановления и остаточную прочность, скорости процесса самовосстановления и стойкости материала после процесса самовосстановления.

### **Личный вклад автора.**

Автором самостоятельно проведен анализ научно-технической литературы в исследуемой области, сформулирована научно-техническая проблема, поставлены цели и задачи для ее решения, разработана программа исследований, проведены экспериментальные исследования и анализ полученных результатов, выявлены основные закономерности влияния рецептурных и технологических факторов на структурообразование и свойства разработанного асфальтобетона с функцией самовосстановления, модифицированного капсулированным полимером. Проведено проектирование принципиальной технологической схемы производства капсулированного модификатора и самовосстанавливающегося асфальтобетона с его применением.

**Степень достоверности результатов** обеспечивается проведением экспериментальных исследований с достаточной воспроизводимостью; статистической обработкой полученных экспериментальных данных; сопоставлением результатов, полученных разными методами, а также сравнением с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

#### **Апробация результатов.**

Основные положения и результаты научно-квалификационной работы были представлены на российских и международных научно-практических конференциях, семинарах и выставках:

XXX Международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения». М., Изд. «Интернаука» (г. Москва. 2019); Международная научно-практическая конференция «Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future» (г. Белгород, БГТУ им. В.Г.Шухова, 2021); II Всероссийская конференция «Строительное материаловедение: настоящее и будущее». (г. Москва. 2021); II Национальная научная конференция «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования-2021» (г. Москва. 2021); 4th International Conference on Advanced Composite Materials – ICACM-2021(Япония, Токио, Университет Хосэй, 2021); VIII Международная научная конференция «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании» (г. Москва, НИУ МГСУ, 2022); III Национальная научная конференция «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования» (г. Москва НИУ МГСУ, 2022); Международная научно-практическая конференция «Перспективные задачи инженерной науки» (г. Москва, МИА и РИА, 2023 г.).

#### **Публикации.**

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных из-

даний, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий) и 4 статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 228 страниц машинописного текста, 57 рисунков и 40 таблиц. Список литературы включает 205 наименований.

Содержание диссертационной работы «Самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным модификатором» соответствует формуле специальности и областям исследований паспорта научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

## **ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА**

### **1.1 Современные дорожно-строительные материалы на основе битума**

В современном строительном материаловедении большее распространение получают материалы на основе органических вяжущих, которые отличаются широким спектром функциональных параметров, позволяющие их использовать в изделиях и конструкциях различного назначения. В дорожном строительстве самым распространенным строительным материалом, для производства которого используется органическое вяжущее (битум), является асфальтобетон.

Асфальтобетоном называется композиционный строительный материал, получаемый из асфальтобетонной смеси, состоящей из рационально подобранного соотношения полифракционных минеральных материалов и расплава битумного вяжущего, в результате структурообразования в процессе ее уплотнения и отвердевания [1].

Асфальтобетоны применяются при строительстве автомобильных дорог при устройстве оснований или покрытий, аэродромов, различных площадок, производственных цехов и других территорий различного назначения.

Широкое распространение асфальтобетона в строительстве обуславливается сочетанием показателей качества и особенностям структуры, которые способствуют обеспечению автоматизации и механизации технологии производства смесей и ремонтпригодности конструкций. Асфальтобетонные дорожные покрытия отличаются меньшим износом под действием автотранспорта, и климатических факторов, повышенной шероховатостью и лучшим сцеплением колеса.

Асфальтобетоны классифицируются по различным видам в соответствии нормативными документами, которые регламентируют требования, как к их составу, так и свойствам.

В соответствии с действующим в настоящее время ГОСТ 9128-2009 асфальтобетоны классифицируются на виды и типы в зависимости от температуры приготовления и укладки смесей, плотности и гранулометрического состава (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация асфальтобетонов и асфальтобетонных смесей в соответствии с ГОСТ 9128-2009

№	Классификация	Параметр классификации
По температуре приготовления и укладки		
1	Горячие	Температура приготовления от 140 до 160 °С Температура укладки не менее 120 °С
2	Холодные	Температура приготовления до 120 °С Температура укладки не менее 5 °С
По наибольшему размеру зерен		
1	Щебеночные	Диаметр зерен до 40 мм
2	Мелкозернистые	Диаметр зерен до 20 мм
3	Песчаные	Диаметр зерен до 5 мм
По плотности		
1	Высокоплотные	Остаточная пористость от 1,0 до 2,5 %
2	Плотные	Остаточная пористость от 2,5 до 5,0 %
3	Пористые	Остаточная пористость от 5,0 до 10,0 %
4	Высокопористые	Остаточная пористость более 10 %

Кроме того, начало XXI века для дорожно-строительной отрасли Российской Федерации характеризуется масштабной переработкой нормативных документов,

регламентирующих требования к асфальтобетонам в соответствии с современными условиями эксплуатации автомобильных дорог, компонентам, применяемым для их производства, а также к правилам проектирования асфальтобетонных смесей. Основой для переработки государственных стандартов в области технологии дорожных бетонов послужил вступивший в действие технический регламент Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог», требования которого гармонизированы с различными Европейскими соглашениями и Директивами, поэтому разработка обновленной системы нормативного обеспечения производилась в направлении гармонизации.

В процессе гармонизации национальных государственных стандартов с зарубежными нормативными документами, определяющих качество асфальтобетонов, сформировались две основные системы объемно-функционального проектирования составов асфальтобетонов:

- система объемно-функционального проектирования на основе системы «Superpave» (США);
- специализированная система проектирования «Евроасфальт».

Каждая из систем проектирования регламентируется комплексом нормативных документов, определяющих классификацию асфальтобетонов в соответствии с разделением на асфальтобетонные смеси и щебеночно-мастичные смеси, нормативные требования к показателям свойств асфальтобетонов, правила проектирования, требования к компонентам асфальтобетонных смесей и методы испытаний.

Наличие двух систем проектирования составов асфальтобетонов обуславливает наличие отдельной классификации асфальтобетонов для каждой системы, которые отражены в соответствующих нормативных документах. Основная классификация основана по показателю максимальной крупности применяемого минерального



заполнителя, как для асфальтобетонов, так и для щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

Дополнительными показателями, по которым классифицируются типы асфальтобетонов, являются условия движения автотранспорта для проектируемого участка автомобильной дороги с учетом количества приложенной расчетной нормативной нагрузки, и наименование конструктивного слоя дорожной одежды, в котором планируется использовать смесь.

Расчетная нормативная нагрузка АК-11,5 – модель нагрузки транспортного средства равная 115 кН, установленная по наибольшим значениям временных нагрузок нормальной эксплуатации с учетом перспективы.

Количество приложений расчетных нагрузок, равных 115 кН, рассчитывают по формуле

$$N_{115} = N_i \cdot K, \quad (1.1)$$

где  $N_{115}$  – количество приложений расчетных нагрузок, равных 115 кН;

$N_i$  – количество приложений расчетных нагрузок, определяемое в соответствии с действующими нормативно-техническими документами в области проектирования;

$K$  - переводной коэффициент.

Переводной коэффициент  $K$  рассчитывают по формуле

$$K = (Q_i/115)^4, \quad (1.2)$$

где  $Q_i$  – расчетная одноосная нагрузка для данной автомобильной дороги, определяемая в соответствии с действующими нормативно-техническими документами в области проектирования, кН; 115 – одноосная нагрузка, кН;

4 – показатель степени, принимаемый для всех типов дорожных одежд.

Классификация асфальтобетонов в соответствии с системой объемно-функционального проектирования на основе системы «Superpave» представлена в национальном стандарте РФ ГОСТ Р 58401.1 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования», а классификация щебеночно-мастичных асфальтобетонов в ГОСТ Р 58401.2 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования».

Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь представляет собой горячую смесь минеральных заполнителей, битумного вяжущего и стабилизирующей добавки, подобранная в таких пропорциях, чтобы формирование контактной структуры. Стабилизирующая добавка в смеси используется для предотвращения стекания битумного вяжущего с зерен минерального заполнителя.

В зависимости от номинально максимального размера применяемого минерального заполнителя асфальтобетонные смеси подразделяют на следующие типы:

- SP-4 – асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 4,0 мм;
- SP-8 – асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 8,0 мм;
- SP-11 – асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 11,2 мм;
- SP-16 – асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 16,0 мм;

– SP-22 – асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 22,4 мм;

– SP-32 – асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 31,5 мм.

Номинально максимальный размер минерального заполнителя (мм) – размер минерального заполнителя, соответствующий размеру ячейки сита, которое на один размер больше первого сита, полный остаток минерального заполнителя на котором составляет более 10%.

В зависимости от количества приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя дорожной одежды асфальтобетонные смеси могут быть запроектированы для дорог:

- с легкими условиями движения (Л) – до 0,5 млн. приложений АК-11,5;
- с нормальными условиями движения (Н) – от 0,5 до 1,8 млн. приложений АК-11,5;
- с тяжелыми условиями движения (Т) – от 1,8 до 5,6 млн. приложений АК-11,5;
- с экстремально тяжелыми условиями движения (Э) – более 5,6 млн. приложений АК-11,5.

Асфальтобетонные смеси классифицируют, как *крупнозернистые* в случае если значение прохода на первичном контрольном сите превышает нормативное и *мелкозернистые* – если не превышает.

Щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси в зависимости от номинально максимального размера применяемого минерального заполнителя подразделяют на следующие типы:

- SMA-8 – щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 8,0 мм;

- SMA-11 – щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 11,2 мм;
- SMA-16 – щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 16,0 мм;
- SMA-22 – щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь с номинально максимальным размером зерен применяемого минерального заполнителя 22,4 мм.

В зависимости от номинально максимального размера зерен применяемого минерального заполнителя асфальтобетонные и щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси в соответствии с системой «Евроасфальт» подразделяют на типы в соответствии с таблицей 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация асфальтобетонов и асфальтобетонных смесей в соответствии с системой «Евроасфальт»

Номинально максимальный размер зерен применяемого минерального заполнителя, мм	Асфальтобетонная смесь	Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь
31,5	A32	–
22,4	A22	ЩМА22
16,0	A16	ЩМА16
11,2	A11	ЩМА11
8,0	A8	ЩМА8
5,6	A5	–

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

- О – смеси для слоя основания;
- Н – смеси для нижнего слоя покрытия;

– В – смеси для верхнего слоя покрытия.

В зависимости от условий дорожного движения смеси подразделяют на:

– Л – смеси для дорог с легкими условиями движения (до 0,5 млн. приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчётный срок службы конструктивного слоя);

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

– Т – смеси для дорог с тяжелыми условиями движения (более 1,8 млн. приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчётный срок службы конструктивного слоя).

Классификация асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов осуществляет разделение материалов по их структуре и свойствам, которыми она обладает при различных соотношениях компонентов в составе.

### **1.1.1 Структура и свойства асфальтобетона**

Структура в асфальтобетоне формируется из отдельных элементов, количество которых и их взаимное расположение в объеме зависит от состава асфальтобетонной смеси и качества применяемых компонентов.

В качестве основных элементов структуры в асфальтобетоне можно выделить минеральные зерна, различного гранулометрического состава, органическую матрицу и воздушные полости (поры). Различное соотношение компонентов в смеси обеспечивает получение различных видов структуры асфальтобетона: базальная, поровая и контактная [2].

Базальная структура образуется при таком количестве органического вяжущего, при котором зерна минерального каркаса расположены в объеме матрицы без

контактирования между собой. Асфальтобетон с такой структурой отличается невысокими показателями физико-механических свойств, так как его свойства определяются свойствами органического вяжущего. Применение таких смесей осуществляется на участках с невысокой интенсивностью и осевыми нагрузками, при устройстве тротуаров, отстоков, а также полов в цехах промышленных зданий.

При снижении содержания битума происходит формирование структуры с образованием каркаса из минеральных зерен, которые контактируют между собой через прослойки органического вяжущего, и пор. В этом случае объем матрицы и пустот минерального каркаса равны. Асфальтобетоны с такой структурой обладают большей устойчивостью к внешним нагрузкам и климатическим воздействиям, поэтому их используют при устройстве верхних слоев покрытия автомобильных дорог с различной интенсивностью движения.

Дальнейшее уменьшение содержания битума в составе асфальтобетонной смеси при уплотнении будет способствовать формированию контактной структуры, в которой объем органического вяжущего меньше объема пустот минерального остова. Поверхность такого асфальтобетона характеризуется высокой шероховатостью, что обеспечивает при использовании для устройства оснований автомобильных дорог повышенное сцепление с последующими слоями [3].

Таким образом, технологические параметры приготовления асфальтобетонной смеси, ее уплотнения, вид и свойства применяемых компонентов, а также их взаимодействие между собой оказывает влияние на структуру асфальтобетона.

Большой вклад в исследование процессов формирования структуры асфальтобетонов внесли отечественные ученые, такие как Волков М.И. [2, 4, 5], Воробьев В.А. [6, 7], Гезенцевей Н.Б. [8...10], Горелышев Н.В. [11...13], Золотарев В.А. [14, 15], Иванов Н.Н. [16...18], Королев И.В. [19...21], Котлярский Э.В. [3, 22...24], Рыбьев А.И. [1, 25...27], Васильев Ю.Э. [28...30], Ядыкина В.В. [31, 32] и другие.

Процесс формирования структуры асфальтобетона начинается на стадии приготовления асфальтобетонной смеси, когда смесь минеральных компонентов совмещается с расплавом органического вяжущего.

Основным минеральным компонентом, оказывающим существенное влияние на формировании структуры асфальтобетона, является минеральный порошок, который вступает во взаимодействие с битумом. В зоне контакта битума и минерального порошка происходит комплекс физико-химических процессов, которые способствуют формированию приграничного слоя вяжущего, отличающегося свойствами от объемного битума. В процессе физической адсорбции, обусловленной Ван-дер-ваальсовыми силами, и химической адсорбции происходит перераспределение органических фракций битума в объеме материала, на поверхности зерен наполнителя формируется адсорбционный слой, состоящий из ориентированных высокомолекулярных соединений (асфальтено-смолистых комплексов) [33]. За счет формирования более прочных хемосорбционных связей прослойка на поверхности зерен минеральных компонентов отличается большей плотностью, прочностью и водостойкостью. Толщина структурированных слоев в зависимости от свойств битума и поверхностных свойств минеральных компонентов могут быть от 0,08 до 2 мкм [21, 34, 35].

Таким образом, структура асфальтобетона представляет собой совокупность связей на различных масштабных уровнях [3, 5, 21, 35]: микроструктура, мезоструктура и макроструктура. Микроструктура, которая определяется взаимодействием в приграничных слоях битума с поверхностью минерального компонента; мезоструктура – битумно-минерального вяжущего и мелкого заполнителя и макроструктура, в которой дополнительным элементом являются зерна крупного заполнителя.

Основное влияние на макроструктуру оказывает фракционный состав и взаимное расположение зерен крупного заполнителя, роль которого в составе асфальтобе-

тоне заключается в формировании жесткого каркаса, препятствующего сдвиговым нагрузкам.

Формирование мезоструктуры происходит при совмещении мелкого заполнителя и вяжущего вещества, которая обуславливает повышение показателей плотности и деформативности асфальтобетона в покрытии.

Ключевым элементом структуры асфальтобетона являются связи, формирующиеся на микромасштабном уровне, при взаимодействии битума и минерального наполнителя. При этом формирование качественной структуры, обеспечивающей лучшие значения показателей свойств асфальтобетона достигается при оптимальном соотношении минерального порошка и битума. При недостатке битума в структуре, на поверхности зерен наполнителя сплошная оболочка образовываться не будет, что в условиях воздействия влаги отрицательно скажется на физико-механических свойствах асфальтобетона. Избыток вяжущего, так же будет снижать прочность структуры, так как объем свободного битума будет значительно больше объема структурированного, а контактирование зерен минерального наполнителя происходить не будет, и теплостойкость асфальтобетона закономерно снизится. Максимальная прочность достигается при соотношении компонентов, обеспечивающих плотное расположение зерен минерального порошка, которые контактируют через прослойки структурированного битума.

Таким образом, подбор содержания компонентов и оптимизация состава асфальтобетонной смеси позволяет контролируемо получать материал с заданной структурой и регулировать свойства асфальтобетона. При этом улучшение свойств асфальтобетона с оптимальной структурой может достигаться использованием в составе смеси различного рода модифицирующих добавок. Различные виды добавок могут оказывать влияние как на комплекс физико-механических свойств, так изме-



нять отдельные показатели эксплуатационных или технологических свойств, выбор которых осуществляется исходя из условий эксплуатации.

В связи с наличием в России трех действующих комплексов нормативных документов предъявляющих требования к качеству производимых асфальтобетонных смесей, отличие наблюдается не только в классификации, но и в показателях свойств асфальтобетонов.

На основе отечественных исследований для установления требований к асфальтобетонам был разработан и в 1960 году введен в действие ГОСТ 9128, который в дальнейшем актуализировался в 1967, 1976, 1984, 1997, 2009, 2013 годах и в *настоящее время* является действующим нормативным документом. В 2002 году был утвержден ГОСТ 31015, регламентирующий требования к щебеночно-мастичному асфальтобетону, и ГОСТ Р 54401 для литых асфальтобетонов – в 2011 году.

При этом количество показателей свойств для каждого вида асфальтобетонов отличаются, а методы испытаний для их определения регламентируются единым стандартом ГОСТ 12801 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства» (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Показатели свойств, регламентируемые ГОСТ, для асфальтобетонов, ЩМА и литых асфальтобетонов

Показатель свойств	Регламентируется для АБ		
	ГОСТ 9128	ГОСТ 31015	ГОСТ 54401
Остаточная пористость	+	+	+
Пористость минеральной части	+	+	+
Водонасыщение	+	+	+
Предел прочности при сжатии при 0 °С	+		
Предел прочности при сжатии при 20 °С	+	+	
Предел прочности при сжатии при 50 °С	+	+	
Водостойкость	+		
Водостойкость при длительном насыщении		+	
Сдвигоустойчивость: коэффициент внутреннего трения	+	+	
Сдвигоустойчивость: сцепление при сдвиге	+	+	
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при 0 °С	+	+	+

Основным объемным свойством, к которому предъявляются требования для всех видов асфальтобетонов, является остаточная пористость, отражающая объемное содержание пор в асфальтобетоне. При этом количество открытых пор выражается в показателе водонасыщения, представляющий собой относительный объем воды, которым насыщается асфальтобетон.

Асфальтобетон является термопластом, поэтому при повышении температуры проявляются его вязкопластичные свойства, что приводит к заметным деформациям в случае возникновения незначительных напряжений, так как битумные прослойки между зернами минеральных компонентов приобретают жидкое состояние. При меньших температурах структура асфальтобетона в упругопластическом состоянии обуславливается упруго-эластическими свойствами при напряжениях меньших предела текучести и упруго-вязкими свойствами при больших напряжениях. При пониженных температурах в асфальтобетоне зерна минеральных компонентов связываются вязущим, имеющим стекловидное состояние, а структура обладает упруго-хрупкими свойствами.

Поэтому для отражения способности асфальтобетона сопротивляться напряжениям при различных температурах предусмотрены показатели предела прочности при сжатии, которые определяются при 0 °С, 20 °С и 50 °С. Стоит отметить, что предел прочности при сжатии указывает на максимально допустимую нагрузку, которая соответствует напряжениям, вызывающим ослабление сцепления вязущего и разрушение асфальтобетона. Так как в большинстве случаев разрушение в асфальтобетоне происходит по битуму, то и предел его прочности определяется прочностью битумных пленок.

Также со свойствами битума и температурой окружающей среды связано явление релаксации напряжений, самопроизвольного снижения напряжений, которое характерно для асфальтобетонов и отражается показателем времени релаксации. Увеличение времени релаксации обуславливает большую способность сопротивления сдвиговым нагрузкам при повышенных эксплуатационных температурах, связанную с преобладанием упругих свойств.

В покрытии асфальтобетон при положительных температурах работает в условиях действия сдвиговых нагрузок, поэтому основным показателем его температур-

ной устойчивости является сдвигоустойчивость, которая характеризуется в соответствии с ГОСТ 12801 коэффициентом внутреннего терния и сцеплением при сдвиге.

Величина показателей сдвиговой устойчивости асфальтобетона зависит от трения в битумных пленках, возникающего под действием напряжений. При этом под действием сил перемещение битума происходит неравномерно, так как элементы структуры воспринимают возникающие напряжения по-разному и под действием межмолекулярных и поверхностных сил величина их перемещений отличается. Это обуславливается неравномерностью распределения асфальтенов в битумных пленках, в результате чего вязкость и плотность по мере приближения к поверхности зерен минеральных компонентов увеличивается.

Присутствие воды в структуре интенсифицирует процессы разрушения возрастает, так как в процессе длительного воздействия вода проникает под пленку битума и приводит к ее отслаиванию от поверхности зерен минерального материала за счет снижения поверхностной энергии стенок трещин и ослабления структурных связей у вершины трещины в процессе ее образования [36]. Поэтому водостойкость асфальтобетона зависит от свойств поверхности зерен минеральных компонентов и адгезионных связей, которые формируются при взаимодействии с битумом.

Таким образом, увеличение стойкости асфальтобетона к воздействию воды достигается повышением прочности контакта битума с поверхностью минерального материала, а также увеличением водонепроницаемости битумных пленок.

В процессе гармонизации нормативных документов в области дорожного строительства в России сформировались два дополнительных комплекса нормативных документов, в основе которых заложен опыт проектирования и исследования асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов зарубежных исследователей из США и Евросоюза.

Показатели свойств асфальтобетонов и ЩМА в соответствии с системой объемно-функционального проектирования на основе «Supergrave» регламентируются ГОСТ Р 58401.1 и ГОСТ Р 58401.2, соответственно. Показатели свойств асфальтобетонов и ЩМА в соответствии со специализированной системой проектирования «Евроасфальт» регламентируются ГОСТ 58406.2 и ГОСТ Р 58406.1, соответственно (рисунок 1.1).

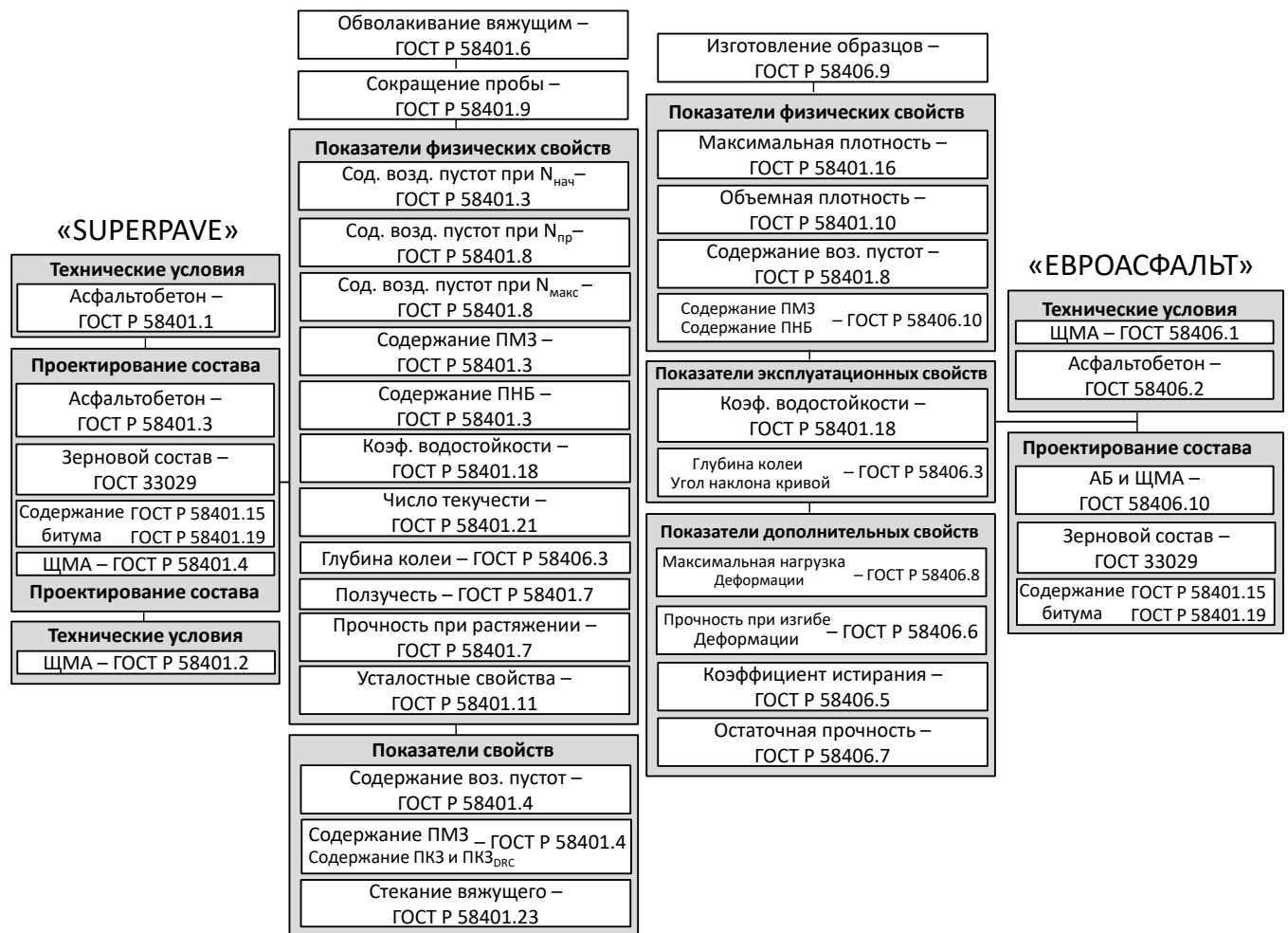


Рисунок 1.1 – Декомпозиция нормативного регулирования качества асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов по системе «Supergrave» и «Евроасфальт»

Новые стандарты регламентируют требования по другим показателям свойств, определение которых также осуществляется по методикам отличающихся от ГОСТ 12801. Ключевой особенностью показателей свойств асфальтобетонов, спроектированных по указанным стандартам, является их ориентированность на моделирование схем нагружения асфальтобетона в дорожном покрытии.

В реальных условиях эксплуатации дорожного полотна асфальтобетон подвергается динамическому воздействию нагрузок, величина которых значительно меньше предельных значений, поэтому показатель предела прочности не позволяет характеризовать состояние материала в конструкции и способность работать в заданных условиях.

Ключевым показателем, отражающим качество асфальтобетона, является его пластичность, которая характеризуется способностью необратимо деформироваться под влиянием действующей нагрузки. Пластические деформации в асфальтобетоне обуславливаются перегруппировкой молекул в структуре битума и перемещению относительно друг друга, как их агрегатов, так и минеральных частиц. Величина необратимых деформаций зависит от температуры среды, величины нагрузки, фракционного состава битума и степени структурирования адсорбционных пленок.

Накопление остаточных деформаций от повторяющихся нагрузок характеризуется показателями усталостных свойств, которые выражаются в глубине колеи, образовавшейся на образцах асфальтобетона, и динамического модуля упругости.

При этом различных подход в оценке качества асфальтобетонов различными системами проектирования позволяет сохранить основной принцип проектирования состава асфальтобетонной смеси, который заключается в подборе зернового состава, отвечающего требованиям нормативных документов, и оптимального количества вяжущего, обеспечивающего необходимые объемные и физико-механические свойства асфальтобетона.

### 1.1.2 Особенности эксплуатации асфальтобетона

Показатели свойств, предусмотренные стандартами, характеризуют качество асфальтобетона после завершения процесса строительства, однако эксплуатация автомобильных дорог является длительным процессом, в течение которого асфальтобетонные покрытия должны сохранять потребительские качества.

Долговечность автомобильных дорог зависит от способности асфальтобетона в покрытии сопротивляться динамическому воздействию комплекса эксплуатационных факторов, как механических, так и погодно-климатических.

Динамические механические нагрузки на асфальтобетонное покрытие возникают от воздействия автомобильного транспорта, величина которых зависит от интенсивности транспортного потока, скорости движения, осевых нагрузок и др.

К динамическим погодно-климатическим факторам относятся воздействия атмосферных явлений, интенсивность которых зависит от климатических условий, в которых располагается дорожное покрытие. Среди погодных явлений основными факторами оказывающими влияние на свойства асфальтобетона выделяют температуру воздуха, количество циклов перепада температуры воздуха через значение 0 °С, объем жидких осадков, а также суммарная солнечная активность в виде радиационной нагрузки.

В виду большой протяженности территории России как с севера на юг, так и с запада на восток, климатические условия в различных регионах значительно отличаются. Это обуславливает необходимость разделять подход к проектированию составов асфальтобетонных смесей в различных регионах страны с учетом особенностей климата.

Под влиянием осадков, асфальтобетон способен поглощать воду внутрь пор, что в случае проникновения ее под адсорбционные слои битума, будет приводить к

разрушению адгезионных связей с минеральным материалом, в результате чего прочность структуры снижается.

При отрицательных температурах вода в порах асфальтобетона в процессе кристаллизации увеличивается в объеме на 8...9 %, создавая при этом внутреннее давление более 200 МПа, которое при много кратном оттаивании и замораживании приводит к образованию дефектов и разрушению асфальтобетона.

Под влиянием температуры и воздействия солнечной радиации в асфальтобетоне протекают термоокислительные процессы старения, сопровождающиеся цепочкой химических реакций, в результате которого происходят необратимые изменения компонентов битума [29]. В результате процесса старения происходит изменение группового состава битума, за счет испарения легких фракций, увеличения концентрации асфальтено-смолистых комплексов и превращения смол в асфальтены, которое приводит к увеличению упругих свойств асфальтобетона, повышению хрупкости и снижению трещиностойкости асфальтобетона.

Механическим фактором износа асфальтобетона при эксплуатации является истирание от воздействия автомобильного колеса, которое происходит при проскальзывании шины по поверхности дорожного покрытия. При низком сцеплении битума и зерен минерального материала или наличии дефектов в структуре из асфальтобетона происходит выкрашивание отдельных частиц, интенсивность которого зависит от адгезионных свойств вяжущего.

Таким образом, эксплуатационные условия предполагают воздействие комплекса внешних факторов, которые способствуют изменению свойств асфальтобетона, а при их совокупном влиянии может наблюдаться синергетический эффект.

В процессе разработки новых технических решений, направленных на продление срока службы асфальтобетонных покрытий, на стадии проектирования составов



необходимо производить оценку способности материала длительное время сопротивляться изменению свойств под воздействием эксплуатационных факторов.

## **1.2 Методики оценки долговечности асфальтобетонов и технологии восстановления эксплуатационных свойств**

Для оценки долговечности асфальтобетонов различными исследователями используется множество различных методов моделирования климатических воздействий в лабораторных условиях [37...42]. При этом подходы к реализации моделирования эксплуатационных факторов в различных работах отличаются, а универсальная методика по оценке влияния климатических воздействий на изменение свойств асфальтобетона отсутствует.

В работе [43] показатели старения и стойкости асфальтобетона к насыщению морской водой используются в качестве критериев оценки климатической стойкости в условия морского климата.

Авторами [44, 45] разработана методика моделирования воздействия погодноклиматических факторов за условный год эксплуатации в условиях динамического насыщения водой и высушивания для летнего периода и замораживания-оттаивания для зимнего периода с учетом температурных режимов.

Однако применяемые методики и режимы испытаний являются частными вариантами воспроизведения воздействия отдельных климатических факторов, корреляция которых с реальными условиями эксплуатации отсутствует, а их использование для прогнозирования долговечности не целесообразно.

Так в работе [46] с использованием информационно-статистического метода [47] по показателям отклонения параметров климата от нормальных условий установлена агрессивность погодноклиматических условий на территории России. Для анализа рассматривалась степень отклонения условий эксплуатации от нормальных

условий по интенсивности производства информационной энтропии для данных о количестве жидких осадков, температуре воздуха, количестве переходов температуры воздуха через значение 0 °С и интенсивности солнечной радиации. Результаты расчетов показали, что на всей территории страны степень отклонения условий эксплуатации от нормальных условий, информационная энтропия, изменяется в диапазоне от 121 до 168 Мбит за весь год, а отклонение значений суммарной интенсивности производства энтропии равно 9,9 Мбит при коэффициенте вариации 6,8 %. Показано, что на всей территории России агрессивность климатических условий для асфальтобетона является одинаковой. Однако вклад каждого рассматриваемого погодно-климатического фактора в агрессивность не установлен, поэтому общий подход для проектирования составов асфальтобетон использоваться не может.

Таким образом, проблема установления влияния каждого погодно-климатического фактора на интенсивность деструктивных процессов в процессе эксплуатации асфальтобетона в настоящий момент является не решенной, что затрудняет разработку методик прогнозирования долговечности и оценки эффективности новых способов увеличения срока службы покрытий автомобильных дорог.

В мировой практике одной из актуальных тематик проводимых исследований является поиск технологических решений, направленных на повышение долговечности строительных материалов, приводящей к увеличению периода эксплуатации изделия или конструкции. Условия эксплуатации естественно варьируются в широком диапазоне, как по видам факторов, так и по их интенсивности. Для дорожных строительных материалов характерны следующие факторы: статические или динамические механические нагрузки, периодичность климатических условий (температура, влажность, ультрафиолет, кислород и др.), воздействие антропогенных и естественных химических и биологических агентов. Вследствие высокой вариативности суперпозиции воздействия факторов, как

правило, предлагаются технологические решения, направленные на нивелирование влияния только некоторых факторов, считающихся ключевыми. На практике восстановление работоспособности изделий и конструкций достигается посредством организационных мероприятий (ремонтно-восстановительные работы), сопровождающихся закономерными экономическими затратами.

С развитием строительной отрасли возрастает потребность в использовании материалов, обладающих уникальным набором свойств, которые способствуют как увеличению функциональной эффективности конструкций, так и снижению материалоемкости производства. Перспективным решением в области материаловедения, направленным на увеличение долговечности конструкций, является создание «умных» материалов (smart materials) [48, 49], способных в процессе эксплуатации контролируемо изменять свойства под влиянием искусственных воздействий или естественных эксплуатационных факторов [50, 51]. Ключевым условием классификации материала как «умного» является обеспечение контролируемых изменений структуры, свойств или функционального состояния, интенсивность которых прогнозируется на стадии проектирования состава материала, а реализация происходит в процессе производства. Для дорожного строительства перспективным видом умных материалов являются материалы, обладающие способностью восстанавливать собственную функциональность в конструкции, предусмотренной его назначением, которую принято называть «самовосстановлением» или «самозалечиванием» (self-healing) [52].

Однако механизмов деструкции материала существенно меньше вариативности факторов, что позволяет предполагать возможность разработки новых технологических решений, направленных на устранение последствий неблагоприятного структурообразования материала в эксплуатационный период. В частности, результатом процесса накопления и развития дефектов является

образование и рост трещин до критических размеров, после достижения которых начинается самопроизвольный их рост (последнее четко показано А.А. Гриффитсом в 1920 г.[53]). В этой связи естественным и принципиальным решением является размещение в объеме материала фазы, способной ликвидировать трещины и не быть подверженной или мало подверженной к деструкции в условиях эксплуатации материала. При этом важно отметить, что вследствие структурных ограничений запас восстанавливающей фазы должен проектироваться на стадии разработки материала и локализоваться в зонах, подверженных интенсивному трещинообразованию.

Важным является также конкретизировать термин «самовосстанавливающийся» материал. Как правило, кинетика изменения структурно-чувствительного параметра  $F$  материала описывается дифференциальным уравнением [54]:

$$\frac{dF}{dt} = -k_t F^n, \quad (1.3)$$

а его решение имеет вид:

$$\frac{f(t)}{F(0)} = \sqrt[1-n]{1 - k_t \frac{1-n}{F(0)^{1-n}} t}, \quad (1.4)$$

где  $F(0)$  – значение структурно-чувствительного параметра начальный период времени;  $n, k_t$  – энергетическая и кинетическая константы;  $t$  – время.

Кинетика изменение значения структурно-чувствительного параметра для обычного и самовосстанавливающегося материала представлена на рисунке 1.2.

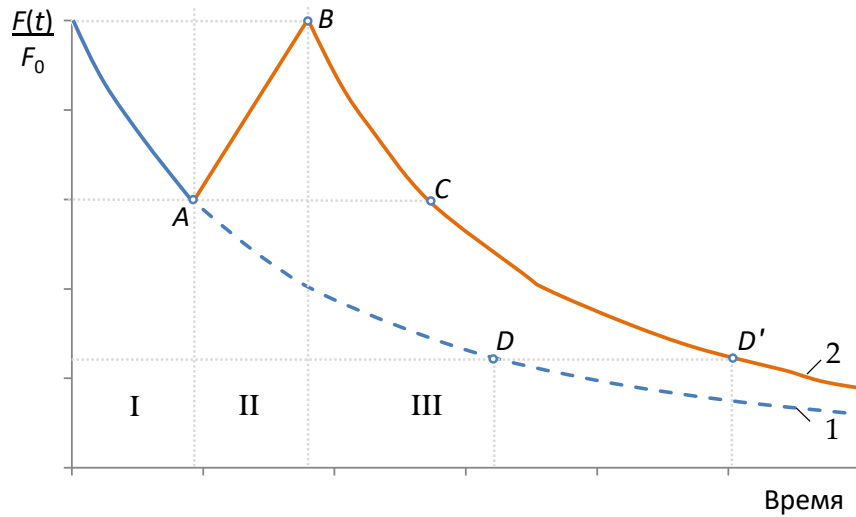


Рисунок 1.2 – Схема кинетики изменения структурно-чувствительного параметра 1 – обычного и 2 – самовосстанавливающегося материала

Для обычного материала изменение структурно-чувствительного параметра в течение эксплуатации описывается в соответствии с формулой (1), для которой энергетическая и кинетическая константы  $n_1$  и  $k_{t1}$  характеризуют интенсивность процесса деструкции. Описание для самовосстанавливающегося материала отличается наличием трех стадий изменения структурно-чувствительного параметра. На стадии I изменение структурно-чувствительного параметра  $F(t)_1/F(0)$  также можно описать с помощью зависимости (1). Однако в момент наступления минимального допустимого значения структурно-чувствительного параметра, в соответствии с которых проектируется состав материала, наступает II стадия самовосстановления материала. Учитывая, что скорость протекания этого процесса должно быть минимальным, то его описание может выполнено с помощью линейной зависимости  $F(t)_2/F(0)=a \cdot (t-t_c) + F(t)_1/F(0)$ , где  $a$  – скорость процесса самовосстановления,  $t_c$  – время при котором достигается критическое значение  $F(t_c)$  и возникает необходимость реализации мер по восстановлению материала. Момент

времени  $t_c$  – является оптимальным для начала процесса самовосстановления, эффективность которого определяется коэффициентом  $a > 0$ . После завершения этапа самовосстановления изменение структурно-чувствительного параметра на стадии III также описывается также уравнением (1), для которого эффективность самовосстановления будет обеспечиваться при значениях энергетической и кинетической константы  $n_2 \leq n_1$  и  $k_{r2} \leq k_{r1}$ .

Анализ уравнений показывает, что скорость достижения критического состояния материала, которое характеризуется его функциональным отказом и необходимостью устранения дефектов, возрастает с увеличением энергетической и кинетической константы. При этом долговечность материалов обеспечивается при  $n$  и  $k_t \rightarrow 0$ .

В этой связи «самовосстанавливающийся» материал – это материал, способный инициировать процесс по ликвидации структурных дефектов, скорость протекания которого превышает скорость их самопроизвольного роста, а стойкость к эксплуатационным условиям сформированной структуры не меньше первоначальной.

Таким образом, разработка решений позволяющих реализовать указанный принцип, который позволит увеличить срок эксплуатации материалов, является актуальной задачей исследований в области материаловедения, в том числе в направлении дорожного строительства.

Тенденция развития научных изысканий в области технологии самовосстановления показывают (рисунок 1.3), что в данном направлении количество публикаций с каждым годом увеличивается, из которых доля работ в области дорожных материалов к 2023 году достигла лишь 4,0 %.

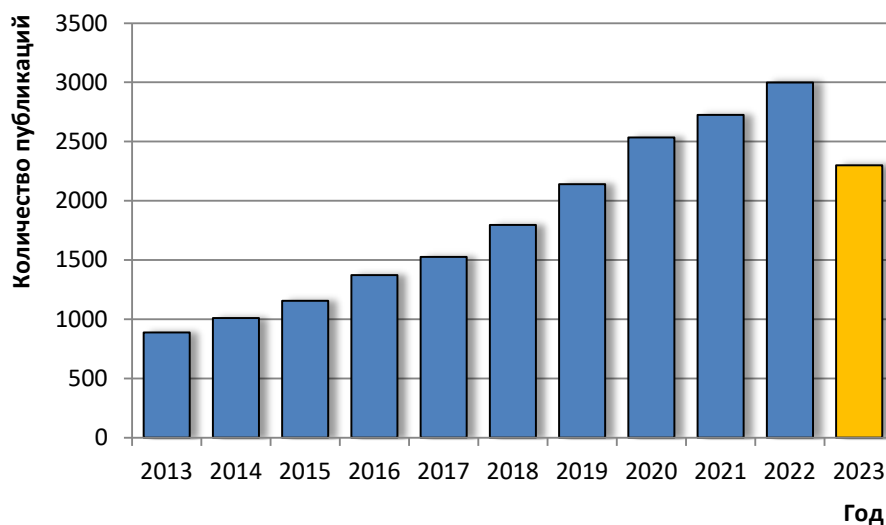


Рисунок 1.3 – Изменение количества публикаций по направлению «self-healing» (по данным [www.scopus.com](http://www.scopus.com) от *май 2023* года)

В строительном материаловедении технологии, предусматривающие самовосстановление, применяются как в полимерных материалах, так и бетонах на основе гидравлических или органических вяжущих. Закономерно, что для различных типов строительных материалов механизм самовосстановления различен [55...60]. При этом как традиционные цементные бетоны, полимербетоны и асфальтобетоны могут обладать собственным потенциалом к самовосстановлению.

Традиционного в составе бетона цемент занимает от 10 до 30 % объема, из которых 20...30 % остаются не гидратированным. Количество цемента в объеме бетона, не вступившего в реакцию, зависит от степени дисперсности цемента и водоцементного соотношения. В процессе эксплуатации конструкций из такого бетона в условиях естественного трещинообразования внутрь материала может проникать вода, которая воздействуя на зерна цемента, будет способствовать гидратации, продукты реакции которой заполняя трещины обеспечат эффект самовосстановления структуры [61]. Проблемой реализации технологии

учитывающей гидратационный потенциал цементных зерен внутри бетона является сложность прогнозирования доступа необходимого количества воды для запуска процесса и прогнозирования степени гидратации необходимой для образования продуктов реакции достаточных для купирования единицы объема дефекта, поры.

Однако особенности гидратационного потенциала могут быть использованы при производстве асфальтобетона на основе наполнителя с применением цемента, когда проникающая под битумные пленки вода способствует началу процесса гидратации и образующиеся кристаллы гидросиликатов, пронизывая пленку, увеличивают сцепление и препятствуют ее отслоению [62].

Большее распространение среди решений, направленных на самовосстановление, получили разработки с использованием алкалофильных эндоспорообразующих бактерии [63...69], запускающие процесс биоминерализации бетона с последующим осаждением кальцита [70]. Для обеспечения восстанавливающего процесса используются бактерии рода *Bacillus*, которые в составе бетона присутствуют совместно с кальциевой солью молочной кислоты (лактатом кальция) и питательными добавками [71...73]. Бактерии начинают свою жизнедеятельность после взаимодействия с водой, расходуют кислород, питаются лактатом кальция, который в последствии преобразуется в карбонат кальция. Таким образом, растворимый лактат кальция преобразуется в нерастворимый кальцит, который в результате способствует купированию трещин и пор внутри материала, препятствуя прониканию влаги и повышая морозостойкость [74]. При этом расходование кислорода бактериями дополнительно способствует повышению коррозионной устойчивости армирующих элементов [75].

Для предотвращения преждевременной активации процесса жизнедеятельности используются бактериальные носители, которые концентрируют



в себе споры и предотвращают их контакт с водой затворения цемента в процессе приготовления бетонной смеси.

В работах [76, 77] в качестве носителя бактерий использовался керамзитовый наполнитель, который насыщался совместно с раствором питательной среды и добавлялся в состав бетонной смеси как заполнитель. Однако невысокая прочность используемого заполнителя приводит к снижению предела прочности при сжатии бетона до 50 %.

Альтернативным способом капсулирования спор бактерий и питательных веществ является гидрогель, который обладает способностью поглощать и удерживать влагу [78]. Представленный метод капсулирования позволил за счет купирования карбонатом кальция трещин шириной до 0,5 мм снизить водопроницаемость на 68 %.

Наибольшее распространение среди способов капсулирования восстанавливающих агентов получили различного вида капсулы, изготовление которых осуществляется на основе полимерных соединений, формирующих при отверждении капсулы [79...83].

Основной проблемой применения капсул с восстанавливающим агентом является снижение физико-механических свойств бетона. Кроме того с учетом большого количества различных методик синтеза капсулированных модификаторов для самовосстановления в настоящий момент отсутствует достаточно данных подтверждающих улучшение физико-механических свойств после восстановления.

Реализация технологии самовосстановления в асфальтобетоне сопряжено с его структурными особенностями и термопластичными свойствами. Учитывая особенности свойств битума, увеличение прочностных характеристик асфальтобетона, установленных нормативными документами, не обеспечивает его долговечность в эксплуатационных условиях [84...86]. При этом повышение предела

прочности асфальтобетона при высоких температурах закономерно приводит к увеличению предела прочности при отрицательных температурах, что отрицательно отражается на его хрупкости.

Поэтому обеспечение баланса между максимальной прочностью при положительных температурах, с минимальной хрупкостью будет одним из условий обеспечения долговечности. Долговечность, представляемая максимальным возможным сроком эксплуатации асфальтобетонного покрытия, в период которого сохраняется его эксплуатационная пригодность и не осуществляется его ремонт или восстановление, достигается за счет неизменности или постоянства состояния структуры материала, которое в течение времени обеспечивает способность в равной степени реагировать на внешние воздействующие факторы без образования дефектов. При этом в процессе эксплуатации дорожного покрытия под воздействием погодных-климатических факторов и нагрузкой автомобильного транспорта в асфальтобетоне происходят необратимые процессы, приводящие к образованию дефектов и нарушению сплошности структуры.

Долговечность асфальтобетона обратно пропорциональна скорости протекания деструктивных процессов и их интенсивности. Таким образом, для обеспечения увеличения сроков службы асфальтобетонного покрытия необходим поиск научно обоснованных решений, позволяющих в период эксплуатации обеспечить длительность состояния структуры асфальтобетона без дефектов за счет придания ему уникальных свойств, позволяющих самостоятельно восстанавливать целостность композита и его способность сопротивляться внешним воздействующим факторам.

Традиционным решением, обеспечивающим продление срока службы асфальтобетонного покрытия, является применение различного рода пропиток, которые используются на этапе эксплуатации с целью предотвращения развития

первичных дефектов [87...91]. Пропитывающие составы после обработки поверхности асфальтобетонного покрытия диффундируют внутрь материала, восстанавливая молекулярный состав битумного вяжущего, что приводит к снижению жесткости [92, 93].

Основным компонентом таких пропитывающих составов, омолаживателей (rejuvenator), являются низкомолекулярные органические соединения, которые растворяясь в битуме, компенсируют потери мальтеновых фракций при старении в процессе эксплуатации [94...101].

Однако, в зависимости от реологических свойств омолаживающих состав их проникающая способность в объем асфальтобетонного покрытия не превышает 20 мм [102], в результате чего эффект восстановления распространяется только на приповерхностные слои покрытия. Необходимость остановки дорожного движения также является недостатком технологии восстановления состояния асфальтобетонного покрытия с помощью пропитывающих омолаживающих составов.

Использование функциональных контейнеров, содержащих омолаживающие, восстанавливающие составы или модификаторы, в виде капсул или полых волокон, позволяет избавиться от указанных недостатков. Реализация подобного решения позволит асфальтобетону в процессе эксплуатации самостоятельно реагировать на изменение структуры с целью восстановления функционального состояния, что позволит относить этот материал к категории «умных» со способностью самовосстановления.

Стоит отметить, что битум как компонент в составе асфальтобетона обладает собственным потенциалом к самовосстановлению (самозалечиванию - self-healing), который зависит как от физических, так и химических свойств [103]. Самовосстановление вяжущего в асфальтобетоне проявляется в период отсутствия

динамического воздействия, которое направлено на восстановление усталостных повреждений в материале. Степень восстановления в этом случае будет определяться временем отдыха от повторных нагрузок [103...105].

Результатом процесса самозалечивания является восстановление целостности структуры физико-химических связей по средствам: смачивания поверхностей трещин, диффузии молекул между поверхностями и произвольного рассеяния молекул, обеспечивающего упрочнение [106, 107]. В битуме самозалечивание может происходить на молекулярном уровне за счет обратимых водородных связей. Интенсивность процесса восстановления в битуме будет зависеть от температурных условий, в которых он будет находиться в период отдыха от повторных нагрузок. Чем выше температура битума, тем процесс восстановления протекает более интенсивно. Эта особенность битума используется при повторной переработке асфальтобетона (recycling).

Собственный потенциал самовосстановления битума используется при реализации технологии индукционного восстановления асфальтобетонного покрытия, который был разработан в Делфтском технологическом университете (Delft University of Technology) [110]. В соответствии с [111...114] в состав асфальтобетона вводится 5...7 % металлической фибры, которая в покрытии подвергается воздействию высокочастотного переменного электромагнитного поля с помощью специальной индукционной установки и нагревается. В процессе нагревания металлических волокон, битум вокруг них расплавляется выше температуры размягчения и происходит восстановление, дефекты в вяжущем ликвидируются [114...116]. При этом повторять процесс залечивания допустимо минимум пять раз с равной степенью восстановления (рисунок 1.4).

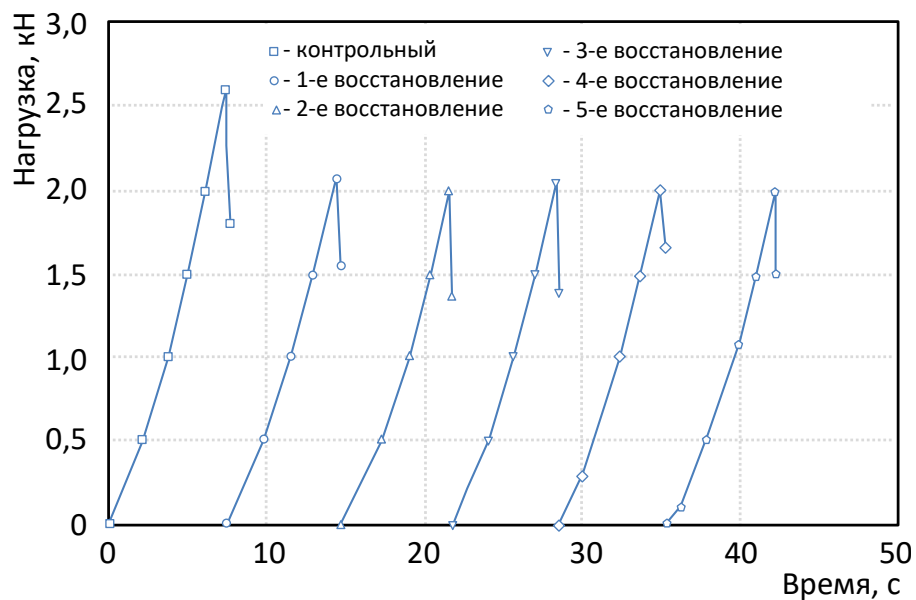


Рисунок 1.4 – Кинетика изменения максимальной нагрузки [106]

Недостатком такой технологии является температурный градиент по толщине асфальтобетонного покрытия, который возникает при индукционном нагреве (рисунок 1.5).

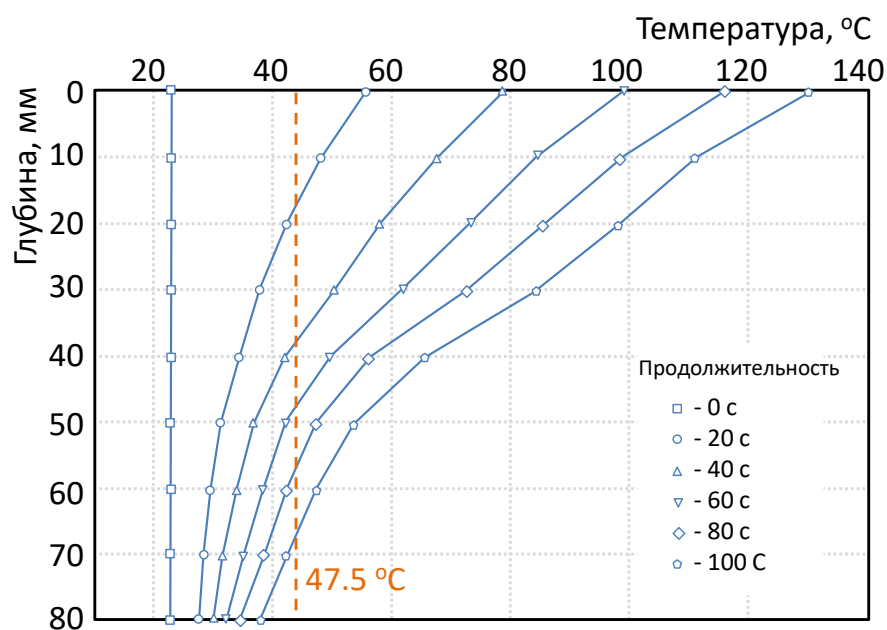


Рисунок 1.5 – Зависимость вертикального распределения температуры длительности индукционного нагрева [107]

Так с увеличением времени индукционного воздействия мощностью 8,3 кВт и частотой 123 кГц на образец разница температуры на поверхности и в объеме на глубине 80 мм может достигать более 90 °С. При этом на максимальном удалении от источника индукционного воздействия температура материала оптимальная для восстановления, принятая равной температуре размягчения битума – 47,5 °С, не достигается даже при максимальной продолжительности воздействия [114].

Таким образом, использование индукционного нагрева для восстановления на всю толщину асфальтобетонного покрытия в настоящий момент не является реализуемой. Необходимость разработки специального индукционного оборудования увеличивает стоимость производственного внедрения технологии.

Равномерность процесса самовосстановления в объеме материала может быть достигнуто с помощью технологии капсулирования функциональных агентов и введения их в состав совместно с другими компонентами на стадии приготовления асфальтобетонной смеси. Однако применение решений использования капсулированных модификаторов или бактерий в асфальтобетоне сопряжено с рядом технологических особенностей приготовления асфальтобетонной смеси.

К капсулам, содержащим восстанавливающий агент, так же предъявляются требования по термостойкости и прочности скорлуп, необходимой для сохранения целостности на этапе уплотнения асфальтобетонной смеси, а использование карбонатопроизводящих бактерии, как модификатора не возможно, так как они не выживут при температурах приготовления асфальтобетонной смеси от 140 до 185 °С.

Для производства микрокапсул для асфальтобетона, содержащих восстанавливающий агент, существуют различные технологии, которые отличаются применяемыми исходными компонентами, сложностью технологического процесса и свойствами продукта.

В работе [117] применяется технология двухстадийной коацервации для изготовления микрокапсул на основе форполимера метанол-меламин-формальдегида, модифицированного метанолом. Технология использования меламин-формальдегида при производстве капсул с омолаживающим агентом является не безопасной с точки зрения экологии [118].

В работе [119] рассмотрены варианты получения оболочки капсул, для эмульгированного восстанавливающего агента в воде, из целлюлозы и полимера.

Авторами [120] предложен трехстадийный способ получения микрокапсул, в котором на первом этапе стирол-малеиновый ангидрид в течение 2 часов перемешивается с водой, нагретой до 50 °С, а затем в полученный раствор после доведения pH до 10 с помощью NaOH, вводится восстанавливающий агент. На втором этапе в полученную эмульсию добавляют метанол-меламин-формальдегид и, перемешивая с заданной интенсивностью, нагревают до 80 °С со скоростью 2 °С в минуту. На заключительном этапе для полимеризации оболочки эмульсия выдерживается 2 часа при 80 °С, после чего полученные капсулы фильтруют и сушат в вакуумной печи.

В работе [121] так же предложена многостадийная технология капсуляции восстанавливающего агента, в которой эмульгированный в воде восстанавливающий агент покрывается оболочкой из мочевины и формальдегида.

Наиболее технологически не сложный способ получения микрокапсул предложен авторами [122]. При постоянной скорости перемешивания в воду последовательно добавляются альгинат натрия и восстанавливающий агент. С помощью капельной воронки полученная суспензия делится на отдельные капсулы через раствор хлорида кальция. После фильтрации капсулы сушатся при температуре 40 °С.

Для изготовления кальций-альгинатных капсул использовался альгинат натрия ( $C_6H_7O_6Na$ ), представляющий собой натриевую соль альгиновой кислоты, экстрагированной из бурых водорослей. С целью исключения влияния особенностей восста-

навливающего агента на технологические особенности инкапсуляции в качестве восстановителя использовались традиционные подсолнечное масло.

Альгинат натрия добавлялся в воду в различных пропорциях и перемешивался в течение 2 минут с помощью верхнеприводной мешалки со скоростью вращения привода не менее 2000 об/мин [122]. В полученную суспензию добавлялся восстанавливающий агент и перемешивался в течение 2 минут. Полученная эмульсия делилась на капсулы через капельную воронку с выходным отверстием 0,71 см. Деление осуществлялось в водный раствор хлорида кальция, приготовленный заранее в пропорциях  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}=1/50$ . После фильтрования и промывки, полученные капсулы подвергались сушке в сушильном шкафу при температуре 40 °С в течение 12 часов.

Альгинат натрия отличается невысокой смачиваемостью водой, связанной со склонностью отдельных частиц порошка альгината к интенсивной агрегации в воде с образованием агломератов. Эффективное приготовление суспензии с применением альгината достигается принудительным высокоскоростным перемешиванием, обеспечивающим разрушение агломератов. При интенсивном перемешивании, взаимодействуя с водой, альгинат натрия образует коллоидный раствор.

На следующей стадии приготовления капсул суспензия альгината натрия по каплям добавляется в раствор хлорида кальция, где происходит процесс гелеобразования альгината, который возможен при pH ниже 4. Механизм образования альгинатных гелей включает совместное связывание ионов кальция между расположенными в одну линию лентами макромолекул, которые имеют поры или полости размером 0,19...0,20 нм, соответствующие диаметру иона  $\text{Ca}^{+2}$  [123]. Интенсивное гелеобразование происходит при заполнении пор ионами кальция, обеспечивая поперечное сшивание макромолекул через замещенные катионы натрия  $\text{Na}^+$ . После промывки дистиллированной водой отделенные капли альгинатного геля с эмульгирован-



ным восстанавливающим агентом подвергаются сушке. В процессе высушивания происходит испарение избытка влаги из геля с уменьшением объема, провоцирующее разрушение эмульсии внутри отдельной частицы альгинатного геля с последующим образованием кальций-альгинатной капсулы, содержащей восстанавливающий агент.

Авторами всех рассмотренных работ в качестве восстанавливающего агента применяются омолаживатели (rejuvenators), в виде органических масел различной молекулярной массы. Однако механизм действия такого восстанавливающего агента в асфальтобетоне сводится лишь к растворению в нем состаренных в процессе эксплуатации компонентов битума и локального снижения хрупкости.

Результатом процесса самозалечивания является восстановление целостности структуры физико-химических связей в композите по средствам: смачивания поверхностей трещин, диффузии молекул между поверхностями и произвольного рассеяния молекул, обеспечивающего упрочнение [105].

В случае с омолаживателями на основе масла, указанные процессы не протекают, поэтому эффекта сращивания молекул битума не происходит. Происходит лишь частичное разбавление компонентов битума в омолаживателе, способствующее снижению потенциала развития трещины.

Результатом технологий капсулирования является получение контейнеров, содержащих восстанавливающий агент, которые отличаются как исходными компонентами, так и свойствами получаемых капсул. Основные характеристики таких контейнеров с различной формой отражены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные свойства капсул, содержащих восстанавливающий агент

№	Материал капсулы	Форма	Размер	Восстанавливающий агент (ВА)	Объем ВА	Ссылка
1	Форполимер метанол-меламин-формальдегид	Шар	Диаметр – 100 мкм	Подсолнечное масло	–	[117, 118]
2	Сепиолит	Шар	–	Промышленный восстанавливающий агент	40 %	[119]
3	Полимер	Шар	Диаметр – 1,00...1,30 мм	Промышленный восстанавливающий агент	80 %	[119]
4	Форполимер метанол-меламин-формальдегид	Шар	Диаметр – 10...20 мкм	Промышленный восстанавливающий агент	50 %	[119]
5	Форполимер метанол-меламин-формальдегид	Шар	Диаметр – 57,5 мкм	Масло, содержащее полярные эпоксидные группы	80 %	[120]
6	Альгинат кальция	Шар	Диаметр – 2,90 мм	Подсолнечное масло	48 %	[122]
7	Альгинат кальция	Шар	Диаметр – 1,95 мм	Смесь реюнивателя с раствором полимера олефин-малеинового ангидрида	56 %	[124]
8	Альгинат кальция	Шар	Диаметр – 2,90 мм	Подсолнечное масло	46 %	[125]
9	Альгинат кальция	Волокно	Диаметр – 0,5 мм; длина – 1,5 мм	Подсолнечное масло	70 %	[126, 127]
10	Альгинат кальция	Эллипсоид	Диаметр – 0,98...1,74 мм	Подсолнечное масло	60 %	[128]
11	Альгинат кальция	Шар	Диаметр – 1,95...2,45 мм	Подсолнечное масло	90 %	[128]
12	Альгинат кальция	Шар	Диаметр – 2,5 мм	Подсолнечное масло	94 %	[129]

Получаемые различными методами капсулы могут иметь размеры от 10 мкм до 3 мм, в которых в качестве капсулированного восстанавливающего агента используются преимущественно растительные масла подсолнечника [117, 118, 121...129]. Альтернативным вариантом восстанавливающего агента является промышленный восстановитель (rejuvenator), который представляет собой смесь низкомолекулярных соединений и масел [119...121, 124].

Как правило, капсулы имеют шаровидную или эллипсоидную форму, что облегчает их использование в процесс смешивания с другими компонентами асфальтобетонной смеси. Технология, в которой носителями восстанавливающего агента являются волокна фибры, обладает существенным недостатком: преждевременным разрушением в процессе смешивания и в процессе эксплуатации.

Наибольшее содержание восстанавливающего агента в капсулах достигается в оболочках из альгината кальция, что объясняется простотой технологии приготовления и широким диапазоном варьируемых дозировок компонентов.

Получаемые с помощью различных технологий капсулы отличаются как размерами, так и физико-механическими свойствами, которые должны удовлетворять требованиям по прочности, обеспечивающей их целостность во время приготовления асфальтобетонной смеси и ее уплотнении.

Качество технологии самовосстановления складывается из технологических свойства капсул и восстанавливающих свойств капсулированного агента. В настоящий момент не существует единой методологии контроля способности материала к самовосстановлению. Это обусловлено отсутствием критериев, характеризующих способность материала контролируемым образом самостоятельно реагировать на условия и предпринимать меры по ликвидации неблагоприятного эффекта для свойств или структуры материала.

В работе [130] предложены критерии качества, отражающие эффективность материала с самовосстанавливающей способностью: степень восстановления состояния структуры; скорость восстановления состояния структуры; долговечность восстановленной структуры и своевременность инициирования восстанавливающего процесса. Однако для выбора показателей свойств, которые характеризовали бы каждый из критериев качества необходимо проведение большего количества эмпирических исследований.

Исследуемые авторами [124, 125...133] показатели качества, отражающие самовосстанавливающую способность асфальтобетонов представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Показатели качества, отражающие самовосстанавливающую способность асфальтобетонов

№	Показатель	Условия восстановления		Эффект	Восстанавливающий агент	Ссылка
		Время, ч	Температура, °С			
1	Прочность при 3х-точечном изгибе	4	20±2	73...90 %	Смесь реюнивателя с раствором полимера олефин-малеинового ангидрида	[124] [131]
2		6...192	20±2	до 53 %	Подсолнечное масло	[125]
3		3	20±2	50 %	Реюниватор Modiseal R20	[127]
4		3	20±2	30 %	Растительное масло	[127]
5		3	20±2	24 %	Отработанное подсолнечное масло	[127]
6		6...216	20±2	54...95 %	Подсолнечное масло	[128]
7		5...216	20±2	20...55 %	Подсолнечное масло	[130]
8	Растяжимость	4	20...22	15...90 %	Наночастицы	[129]
9	Жесткость	0,5...1,5	20...22	80...100 %	Наночастицы	[129]
10	Прочность при разрыве	6...48	20...22	до 80 %	Наночастицы	[129]
11	Трещиностойкость	20	23±2	14...19 %	Реюниватор Modiseal R20	[131]
12		20	20±2	–	Смесь реюнивателя с раствором полимера олефин-малеинового ангидрида	[130]
13	Усталостная долговечность	20	20±2	–	Смесь реюнивателя с раствором полимера олефин-малеинового ангидрида	[130]
14	Прочность при изгибе	72	30±2	50...89 %	Реюниватор	[132]

Анализ, представленных работ, показывает, что все предложенные методы оценки самовосстанавливающей способности материалов сводятся к расчету коэффициента относительного изменения измеряемого показателя:

$$HL = \frac{X_h}{X_0}, \quad (1.5)$$

где  $X_0$  и  $X_h$  – показатель свойств материала до и после самовосстановления, соответственно.

Данный коэффициент в соответствии с [134] может быть отнесен к категории показателей, отражающих критерий степени восстановления состояния структуры, что является недостаточным для объективной оценки технологических решений.

При этом только в работе [132] в качестве показателя для оценки самовосстанавливающего эффекта материала используются значения усталостной долговечности, которая в большей степени отражает динамическую схему нагружения в дорожной конструкции. В других случаях [124, 125, 127, 128...131, 133] авторами определяются показатели свойств, характеризующие эксплуатационное состояние материала в момент отказа, когда дефектность структуры является предельной – структура разрушена. Однако в дорожной конструкции инициирование самовосстанавливающего процесса в материале должно происходить на стадии предшествующей разрушению структуры.

Отсутствие единой системы оценки не позволяет объективно сравнивать эффективность различных технологических решений по производству микрокапсул с восстанавливающим агентом, а также производить оценку влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на процесс самовосстановления и его результат.

Таким образом, в дальнейших работах необходимо усовершенствовать не только технологические аспекты, позволяющих получать капсулы с максимальным содержанием восстанавливающего агента, но и разрабатывать методики оценки эффективности разрабатываемых решений, отражающих степень из-

менения дефектности структуры и скорость ее изменения во время восстановления и кинетику образования дефектов в структуре после процесса самозалечивания. Стоит отметить, что установление количественного показателя, отражающего уровень дефектности, при котором инициирование самовосстановления позволяет достичь максимальной эффективности, является одной из ключевых задач в области технологии самовосстановления.

Анализ научно-технической литературы свидетельствует о росте интереса со стороны ученых к исследованиям в области технологии самовосстанавливающихся материалов, а также определенных успехах достигнутых в этом направлении, в том числе и в России.

К самовосстанавливающимся стоит относить те материалы, которые обладают способностью без дополнительных энергетических ресурсов самостоятельно инициировать процессы восстановления состояния структуры, скорость которых превышает скорость образования дефектов.

Существующие технические решения позволяют получать капсулы, содержащие восстанавливающий агент до 90...94 % от общего объема.

Необходимо формулирование общих требований и показателей качества самовосстанавливающихся материалов для строительства, характеризующих степень их эффективности в зависимости от условий применения.

### **1.3 Теоретические предпосылки самовосстановления в асфальтобетоне**

Особенности реализации способности асфальтобетона к самовосстановлению обуславливается его структурными и термопластичными свойствами. При этом особенности термопластичной матрицы обуславливают наличие восстановительного эффекта за счет собственного потенциала вяжущего [103].

Стоит отметить, что в составе асфальтобетона собственным потенциалом к самостоятельному восстановлению (самозалечиванию - self-healing) обладает битум, который зависит от его физико-химических свойств [102]. Самостоятельное восстановление битума в асфальтобетоне происходит в

условиях отсутствия динамического воздействия механического нагружения, которое направлено на ликвидацию дефектов в материале, образованных в результате усталостных повреждений. Интенсивность процесса восстановления будет определяться длительностью отдыха материала от повторных механических нагрузок [102, 104, 105].

Этот эффект обуславливается способностью молекул органического вяжущего самопроизвольно спутываться между собой. При этом интенсивность этого процесса зависит от близости молекул между собой и скорости самопроизвольного движения, которое увеличивается с ростом температуры. Так, при увеличении температуры кинетическая энергия молекул вяжущего и средние расстояния между ними возрастают. Это закономерно приводит к естественным физическим явлениям: увеличению объема материала и снижению вязкости у термопластического материала [107]. В этом случае в зоне дефекта (трещины) при достаточной близости ее поверхностей будет происходить самопроизвольное сращивание вследствие снижения поверхностного натяжения на границе «материал - воздух». Для описания указанного явления можно привлечь теорию Флори – Хаггинса, согласно которой растворение одной фазы в другой происходит при значении изобарно-изотермического потенциала системы:

$$\Delta G = \Delta H_m - \Delta ST < 0, \quad (1.6)$$

(где  $\Delta H_m$  – изменение энтальпии;  $\Delta S$  – изменение энтропии). Согласно Гилдебрандту изменение энтальпии может быть оценено с использованием параметра растворимости  $\delta$ :

$$\Delta H_m = V_m \Phi_1 \Phi_2 (\delta_1 - \delta_2)^2, \quad (1.7)$$

где  $\Phi_i$  – объемная доля компонента;  $V_m$  – объем системы.



Для случая с термопластичной матрицей рационально параметр растворимости определять:

$$\delta_i = a \left( \frac{\sigma}{\sqrt[3]{V_m}} \right)^b, \quad (1.8)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $a, b$  – эмпирические коэффициенты.

При установлении зависимости поверхностного натяжения от температуры можно произвести оценку возможности восстановления (залечивания) трещины при расположении ее стенок на расстоянии  $H_{cr}$ :

$$F = \frac{A}{H_{cr}^3}, \quad (1.9)$$

где  $F$  – сила притяжения;  $A$  – константа Гамакера.

При этом очевидно, что достичь первоначального уровня целостности, при котором спутанность молекул обеспечивает исходное состояние структуры за счет самопроизвольного процесса восстановления невозможно.

Использование в качестве восстанавливающего агента веществ на основе органических масел обуславливается их способностью хорошо растворяться в битумной матрице, что способствует восстановлению состава легких фракций и скорости самопроизвольного движения молекул вяжущего. За счет этого улучшается способность молекул органического вяжущего самопроизвольно спутываться между собой, обеспечивая большую эффективность восстановления.

При этом в ряде работ отмечается [107...109], что процесс самовосстановления битума может происходить на молекулярном уровне за счет обратимых водородных связей (reversible hydrogen bonding) с образованием новых сшивок и цепей через дитопические и тритопические молекулы [109]. Отсутствие механической нагрузки, приводящей к разрушению связей, является условием обеспечивающим «отдых» материала, в период которого происходят

процессы восстановления. Так же с увеличением температуры, в которой материал находится в период отдыха, интенсивность процесса восстановления возрастает.

Для реализации технологии самовосстановления в составе асфальтобетона могут быть использованы различные восстановители, капсулированные в контейнеры. Так восстановители на основе органических соединений выполняют функцию омолаживателей (rejuvenator) матрицы, увеличивая собственный потенциал битумного вяжущего к восстановлению. Восстановители на основе полимером способны выполнять функцию склеивания поверхностей дефектов в композите за счет формирования новых адгезионных связей в процессе преобразования.

Формирование новых адгезионных связей представляет собой двухстадийный процесс, где на первой стадии происходит перемещение восстановителя (адгезива) внутрь материала (субстрата) с ориентацией молекул в граничном слое, а на второй – взаимодействие адгезива и субстрата под влиянием химических или сил Ван-дер-Ваальса. Так на расстоянии между молекулами менее 0,5 нм действуют ковалентные связи, на расстоянии от 1 до 100 нм – ионные связи и силы Ван-дер-Ваальса [135].

Для описания особенностей формирования адгезионных связей при восстановлении могут быть использованы подходы, описанные в механической, молекулярной, химической, диффузной, релаксационной теории адгезии или теории слабых граничных слоев.

В соответствии с механической теорией адгезией прочность адгезионных связей зависит от свойств поверхности субстрата и прочности слоя адгезива, который проникая в неровности, шероховатости и дефекты после затвердевания формирует зоны повышенного трения и заклинивания [136].

Образование связей между полярными функциональными группами обеспечивает прочность адгезионного соединения, которое в соответствии с адсорбционной (молекулярной) теорией адгезией может быть нарушено при из-

менении температуры [137]. А теория слабых граничных слоев предполагает образование граничного слоя со свойствами отличными от свойств адгезива и субстрата [138]. В этом случае прочность новых адгезионных связей определяется интенсивностью взаимодействия адгезива и субстрата.

В диффузной теории адгезии [139] при взаимодействии полимеров молекулы одного диффундируют внутрь другого до 10 мкм и растворяются без образования различимой границы раздела фаз. Для реализации такого механизма формирования адгезионных связей должно выполняться термодинамического и кинетического условие, обеспечивающее необходимую совместимость и подвижность макромолекул.

В соответствии с химической теорией адгезии [135] функциональные группы адгезива адсорбируются на поверхности субстрата и между ними образуются ковалентные или ионные связи, обеспечивая прочное сцепление. При этом необходимо наличие реакционноспособных функциональных групп для формирования прочных ковалентных связей между поверхностью адгезива и поверхностью субстрата [140].

В релаксационной теории адгезии [141] рассматривается влияние процессов возникновения внутренних напряжений и деформаций на прочность адгезии, которая выражается в изменении числа связей, обеспечивающих сцепление. Также существует электрическая теория [142] в соответствии с которой сцепление осуществляется при электризации контакта адгезива и субстрата, вследствие возникновения разности потенциалов, которая к органоминеральным композитам не может быть применима.

Таким образом, теоретические основы математической модели термодинамики растворов полимером в теории Флори – Хаггинса и положения теории адгезии могут быть использованы для описания механизма самовосстановления асфальтобетонов, содержащих капсулированный восстанавливающий агент.

#### **1.4 Цель, задачи и научная гипотеза диссертационного исследования**

**Объект исследования:** Капсулированный полимерный модификатор и щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 со свойством самовосстановления.

**Предмет исследования:** Физико-химические процессы синтеза капсулированного полимерного модификатора и структурообразование асфальтобетона с ее применением.

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованного технологического решения получения асфальтобетона, обладающего свойством самовосстановления за счет использования капсулированного полимерного модификатора.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи** :

– научно обосновать выбор компонентов, состав и технологию изготовления капсулированного модификатора для получения самовосстанавливающегося асфальтобетона;

– исследовать процессы структурообразования и свойства разрабатываемого капсулированного модификатора и самовосстанавливающегося асфальтобетона с его применением;

– установить закономерности влияния основных рецептурно-технологических факторов на физико-механические и эксплуатационные свойства самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором;

– разработать составы и технологические режимы изготовления самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором;

– провести оценку технико-экономической эффективности самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификато-

ром.

На основе проведенного анализа сформулирована **научная гипотеза**, заключающаяся в следующем. Получение саомвосстанавливающегося асфальтобетона достигается использованием капсулированного полимерного модификатора в виде капсул-контейнеров, в которых располагается активный компонент, извлечение которого вследствие разрушения капсулы приводит к его полимеризации в объеме дефекта и восстановлению способности композита сопротивляться механическим нагрузкам.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Показано, что перспективным решением в области материаловедения, направленным на увеличение долговечности конструкций, является создание «умных» материалов (smart materials), способных в процессе эксплуатации контролируемо изменять свойства под влиянием искусственных воздействий или естественных эксплуатационных факторов. Тенденция развития научных изысканий в области технологии самовосстановления, показывает, что в данном направлении количество публикаций с каждым годом увеличивается, из которых доля работ в области дорожных материалов к 2023 году достигла лишь 4,0 %.

2. Выявлено, что наибольшее распространение среди способов реализации технологии самовосстановления получило использование различного вида капсулы, содержащих восстанавливающий агент, изготовление которых осуществляется на основе полимерных соединений, формирующих при отверждении капсулы. В качестве восстанавливающего агента традиционно используется высокомолекулярные соединения, которые в составе асфальтобетоне при восстановлении выполняют функцию омолаживателей.

3. Показано, что с учетом большого количества различных методик синтеза капсулированных модификаторов для самовосстановления в настоящий момент отсутствует достаточно данных подтверждающих улучшение физико-механических свойств после восстановления. Отсутствует единая система оценки самовосстановления, что не позволяет объективно сравнивать эффективность различных технологических решений по производству микрокапсул с восстанавливающим агентом, а также производить оценку влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на процесс самовосстановления и его результат.

4. Показано, что положения теории адгезии могут быть использованы при реализации технологии самовосстановления, принцип действия которой заключается в ликвидации влияния дефектов, образующихся в процессе эксплуата-

ции, достичь которую возможно за счет воссоздания механизмов образования адгезионных связей с помощью капсулированного модификатора.

5. Установлена необходимость формулирование общих требований и показателей качества самовосстанавливающихся материалов для строительства, характеризующих степень их эффективности в зависимости от условий применения.

6. **Объектом** исследования является капсулированный полимерный модификатор и щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 со свойством самовосстановления, а **предметом** Физико-химические процессы синтеза капсулированного полимерного модификатора и структурообразование асфальтобетона с ее применением. Сформулирована научная **гипотеза работы**, которая заключается в следующем: получение самовосстанавливающегося асфальтобетона достигается использованием капсулированного полимерного модификатора в виде капсул-контейнеров, в которых располагается активный компонент, извлечение которого вследствие разрушения капсулы приводит к его полимеризации в объеме дефекта и восстановлению способности композита сопротивляться механическим нагрузкам.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Применяемые материалы и их характеристики

Для получения самовосстанавливающегося асфальтобетона с заданным комплексом свойств использовалось щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ЩМА-15) из битумного вяжущего, крупного и мелкого минеральный заполнитель, минерального наполнителя, стабилизирующей добавки, капсулированного модификатора и активатора.

#### *Вяжущее вещество*

Для производства асфальтобетонной смеси в качестве вяжущего вещества использовался битум БНД 60/90 (ООО «Московский НПЗ»), по показателям качества (Таблица 2.1) отвечающий требованиям ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные. Технические условия».

Таблица 2.1 – Свойства применяемого битума

Показатель	Требования ГОСТ	Фактические значения
Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм	61 – 90	67
Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм	Не менее 20	36
Растяжимость при 20°C, см	Не менее 55	85,2
Растяжимость при 0°C, см	Не менее 3,5	3,6
Температура размягчения, °C	Не ниже 47	51
Температура хрупкости, °C	Не выше -15	-20
Изменение температуры размягчения после прогрева, °C	Не более 5	5
Индекс пенетрации	От -1,0 до + 1,0	-0,6
Температура вспышки, °C	Не ниже 230	253



Для оценки влияния группового состава битума на собственный потенциал самовосстановления асфальтобетона при изготовлении образцов также использовался битум, полученный из исходного путем старения в течение 8 часов при температуре 160 °С. Групповой состав битумов представлен таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Групповой состав битумов

Битум	Содержание фракций, %			
	Парафино-нафтеновые	Ароматические соединения	Смолы	Асфальтены
Исходный (БНД <sub>1</sub> )	7,1	38,5	32,2	22,2
После старения (БНД <sub>2</sub> )	6,5	32,9	38,5	22,1

### *Крупный заполнитель*

Для производства асфальтобетонной смеси в качестве крупного заполнителя использовался щебень из габбро-диабаз фракций от 5 до 20 мм (Карелия), по показателям качества (таблица 2.3) отвечающий требованиям ГОСТ 8267. Гранулометрический состав щебня представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Свойства применяемого щебня

Наименование показателя	Значение показателя
Марка по дробимости	М1200
Марка по истираемости	И1
Марка по морозостойкости	F150
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, %	Л20

Таблица 2.4 – Гранулометрический состав применяемого щебня

Материал	Содержание зерен менее размера ячейки сита мм, %								
	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Щебень	100,0	88,5	38,5	1,6	1,3	1,15	1,1	1,1	1,0

### *Мелкий заполнитель*

Для производства асфальтобетонной смеси в качестве мелкого заполнителя использовался песок из отсева камнедробления гранита, по показателям качества (таблица 2.5) отвечающий требованиям ГОСТ 8736. Гранулометрический состав песка представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Свойства применяемого песка

Наименование показателя	Значение показателя
Плотность истинная, г/см <sup>3</sup>	2,63
Модуль крупности	3,3
Содержание пылевидных и глинистых частиц методом набухания, % по массе, не более	0,2

Таблица 2.6 – Гранулометрический состав применяемого песка

Материал	Содержание зерен менее размера ячейки сита мм, %								
	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Отсев	100,0	100,0	100,0	42,0	27,0	18,1	10,1	4,2	3,5

### *Наполнитель*

Для производства асфальтобетонной смеси в качестве наполнителя использовался неактивированный минеральный порошок из доломита ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), по показателям качества (таблица 2.7) и химическому составу (таблица 2.8) отвечающий требованиям ГОСТ 52129 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей».

Таблица 2.7 – Показатели свойств применяемого минерального порошка

Наименование показателя	Требования	Значение показателя
Плотность истинная, г/см <sup>3</sup>	–	2,82
Плотность (объемная масса), г/см <sup>3</sup>	–	2,30
Пористость, %	не более 35	19
Влажность, % по массе	не более 1	0,4
Битумоемкость, г	–	60
Набухание образца из смеси порошка с битумом, %	не более 2,5	1,9

Таблица 2.8 – Химический состав применяемого минерального порошка

Наименование материала	Содержание, % по массе					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>
МП-1	7,7	0,34	1,12	29,1	20,3	90,9

#### *Восстанавливающий агент*

В качестве восстанавливающего агента в составе модификатора для самовосстановления рассмотрены подсолнечное масло и тиолсодержащий уретановый «AR-полимер».

Основные свойства подсолнечного масла представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Основные свойства подсолнечного масла

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя	Метод
Динамическая вязкость при 25°С	Па·с	0,05	см. раздел 2
Плотность при 25 °С	г/см <sup>3</sup>	0,918 ± 0,05	ГОСТ 3900
Кислотное число	мг КОН/г	0,025 ± 0,01	ГОСТ 31933
Фракционный состав:			
пальмитиновая кислота	%	6,61	ГОСТ 31663
стеариновая кислота	%	3,61	
олеиновая кислота	%	30,91	
линолевая кислота	%	57,13	
другие	%	1,74	

«AR-полимер» представляет собой тиолсодержащий уретановый полимер с концевыми меркаптановыми группами (SH-), произведенный ООО «ПолиМикс Казань» в соответствии с ТУ 2226-001-90014974-11. Основные свойства полимера представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Основные свойства «AR-полимера»

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя
Динамическая вязкость при 25 °С	Па·с	9,7
Содержание SH-групп	%	1,5-2,5
Условная прочность при разрыве после отверждения	МПа	1,0
Относительное удлинение при разрыве	%	100
Относительные остаточные деформации	%	до 6

Отвердителем для полимеризации AR-полимера является активатор, состоящий из технической серы, оксида марганца (IV) и тетраметилтиурамдисульфида, смешанных в соотношении 6,1 : 3,7 : 1,0 (ООО «ПолиМикс Казань»). Кри-

сталлическая сера по показателям свойств соответствовала требованиям ГОСТ 127.1-93 «Серa техническая. Технические условия». Оксид марганца (IV) соответствовал требованиям ГОСТ 4470-79 «Реактивы. Марганца окись. Технические условия». Тетраметилтиурамдисульфид  $C_6H_{12}N_2S_4$  (ТМТД) представляет собой ускоритель и стабилизатор, в резиновой промышленности, который использовался в качестве химического активатора процесса восстановления.

Для синтеза капсулированного модификатора использовался альгинат натрия. Альгинат натрия ( $C_6H_7O_6Na$ ) представляет собой натриевую соль альгиновой кислоты, экстрагируемую из бурых водорослей. Альгинаты являются органическими веществами в виде неразветвленных бинарных сополимеров, структура которых образована остатками  $\beta$ -D-маннуронозой кислоты (М) и  $\alpha$ -L-гиалуронозой кислоты (Г), между собой которые соединены гликозидными связями, различающиеся последовательностью и составом [6].

Структура альгината состоит из звеньев монополимерных М- и Г-блоков, которые в различных распределениях формируют полимерные цепи.

Возможность альгинатов связывать ионы обуславливает их характерную гелеобразующую способность. Сродство молекул альгинатов к поливалентным катионам зависит от их состава, а сродство к щелочноземельным металлам – возрастает в порядке  $Mg < Ca < Sr < Ba$ .

#### *Стабилизирующая добавка*

В качестве стабилизирующей добавки, предотвращающей сегрегацию и стекание битумного вяжущего при технологических температурах, использовались целлюлозные волокна «Viator-66», отвечающие требованиям ГОСТ 31015-2002 «Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия».

## **2.2 Методы получения, исследования и испытания материалов**

Экспериментальные исследования выполнены с использованием современного и высокоточного оборудования НОЦ «Наноматериалы и нанотехноло-

гии» НИУ МГСУ. Исследования проводились с применением современных физико-химических и нормированных методов.

Подбор составов асфальтобетона осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 31015 «Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия». Перемешивание компонентов производилось в асфальтобетоносмесительной установке Bitumix (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Лабораторный асфальтобетоносмеситель Bitumix

Изготовление образцов асфальтобетона и сероасфальтобетона осуществлялось по методам установленным ГОСТ 12801 – 98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний». Для формирования образцов требуемых размеров использовали гидравлический пресс ИП-1А-500 АБ ПК (рисунок 2.2). Изготовление образцов проводили в стандартных формах с диаметром 71,4 мм.



Рисунок 2.2 – Гидравлический пресс ИП-1А-500 АБ

Технологический процесс приготовления асфальтобетонной смеси проводили согласно следующему алгоритму:

- подготовка минеральных материалов (подача и предварительное дозирование, сушка и нагрев до температуры 140...150 °С);
- дозирование и подача минерального порошка в смеситель;
- перемешивание минеральных материалов;
- дозирование и подача капсулированного модификатора (для СВАБ);
- дозирование и подача стабилизирующей добавки;
- перемешивание компонентов в смесителе;
- подготовка битума или модифицированного битума (для СВАБ) (разогрев битума, выпаривание содержащейся в нем влаги и нагрев до рабочей температуры 140...150 °С, добавление модификаторов (для СВАБ)), дозирование перед подачей в смеситель);
- перемешивание минеральных материалов с вяжущим;
- перемешивание асфальтобетонной смеси до однородного распределения компонентов.

Погрешность дозирования компонентов при приготовлении:

- для щебня и отсева дробления :  $\pm 2 \%$ ;
- для минерального порошка и битума :  $\pm 1,5 \%$ ;

- для технической серы и нейтрализаторов эмиссии токсичных газов :  $\pm 1,5 \%$ .

Продолжительность перемешивания смеси определяли, исходя из технологических параметров смеси до достижения равномерного распределения всех компонентов и полного обволакивания зерен минерального материала битумом.

Для обеспечения необходимого зернового состава минеральные компоненты смешивались в следующем соотношения: крупный заполнитель – 67 %; мелкий заполнитель – 21 %; наполнитель – 12 %. Зерновой состав минеральной части разрабатываемого композита представлен на рисунке 2.3.

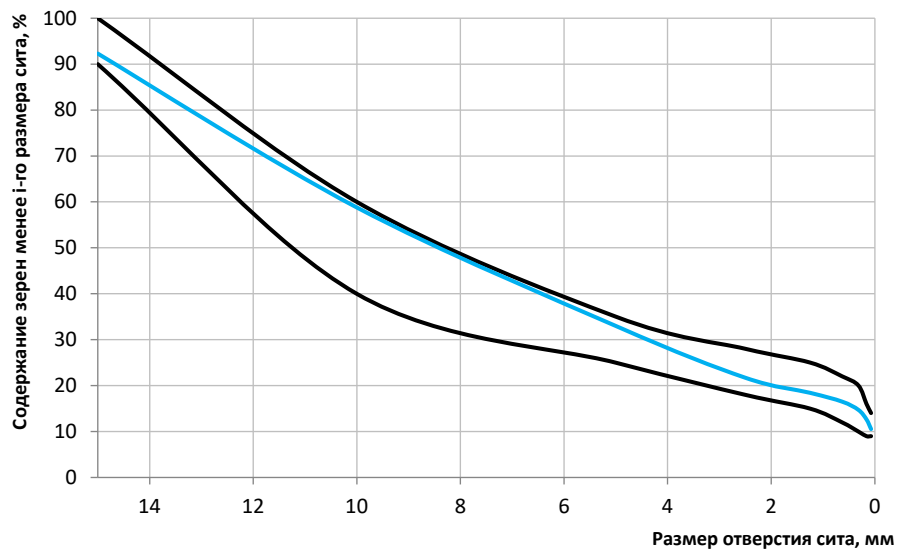


Рисунок 2.3 – Зерновой состав минеральной части ШМА

На следующем этапе с учетом фактической пористости минерального остова экспериментальным путем определялось оптимальное содержание термопластичного вяжущего. Для этого изготавливались стандартные образцы из смеси с различным содержанием вяжущего и по зависимости изменения остаточной пористости определялось оптимальное содержание вяжущего, при котором обеспечивается заданное значение показателя. График зависимости остаточной пористости от содержания вяжущего представлен на рисунке 2.4.



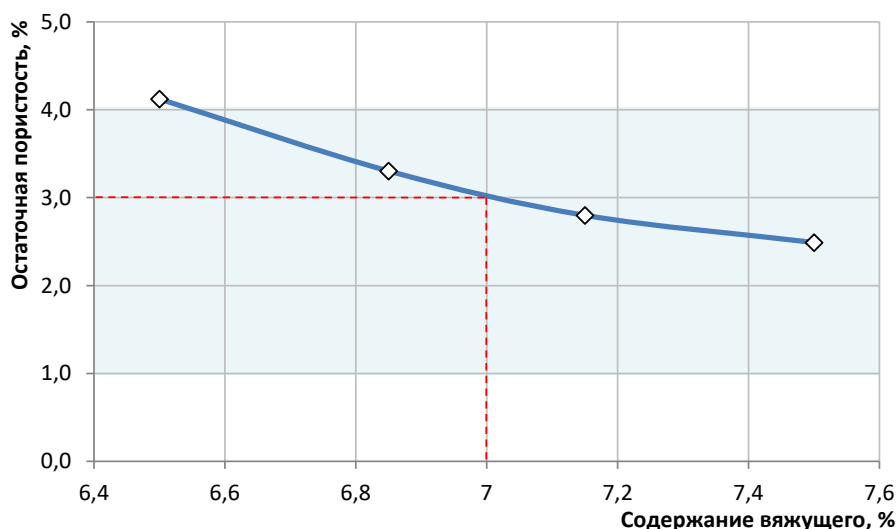


Рисунок 2.4 – Зависимость остаточной пористости ЦМА от содержания вяжущего

С учетом зависимости изменения остаточной пористости оптимальное содержание вяжущего, при котором остаточная пористость 3 % достигается при содержании вяжущего 7 %. В качестве стабилизирующей добавки для предотвращения расслаивания щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси использовались целлюлозные волокна Viator-66 в количестве 0,3 %.

Асфальтобетонная смесь после приготовления использовалась для изготовления образцов-цилиндров высотой и диаметром 71,4 мм. Для этого смесь необходимой массы помещалась в форму и уплотнялась в два этапа: с помощью вибрирования и груза, обеспечивающего нагрузку  $30 \pm 5$  кН в течении 3 минут и последующего уплотнения с помощью гидравлического пресса, обеспечивающего давление  $20,0 \pm 0,5$  МПа в течении 3 минут. Затем образец извлекается из формы с помощью выпрессовочного устройства.

Испытания образцов асфальтобетонов проводили в соответствии с методами исследования, предусмотренными ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного строительства. Методы исследования».

Массу материалов определяли с помощью электронных весов A&D DX-300 (с точностью 0,01 г).

Линейные размеры образцов определяли штангенциркулем с точностью 0,05 мм.

Определение предела прочности при сжатии осуществлялось с использованием прессы UNIFRAME [90].

Групповой углеводородный состав битумов определялся в соответствии с IP 469 с использованием анализатора Iatroscan Mark V (рисунок 2.5) методом тонкослойной хроматографии с пламенно-ионизационным детектором и с кварцевыми стержнями Chromarod TM типа SIII.



Рисунок 2.5 – Анализатор группового углеводородного состава битумов Iatroscan Mark V

Для исследования структуры асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором с использованием метода рентгеновской томографии применялся томограф V|TOME|X M300, General Electric, с помощью которого «послойно» осуществлялось сканирование образца с дальнейшим преобразованием 2400 снимков сечения в 3-D модель.

### **2.2.1 Методика синтеза и исследования капсулированного модификатора**

Технологический процесс капсулирования восстанавливающего агента для модификатора асфальтобетона включает пять основных стадий: приготовление альгинатного раствора с помощью высокоскоростной мешалки; приготовление альгинатной эмульсии восстанавливающего агента с помощью высо-

коскоростной мешалки; деление альгинатной эмульсии восстанавливающего агента на отдельные капли; закрепление отдельных капель альгинатной эмульсии через раствор кальциевой соли в альгинатные шарики; сушка альгинатных шариков. Технологическая схема капсулирования восстанавливающего агента (рисунок 2.6) для асфальтобетона представлена на рисунке 2.7 [121, 122, 143].



Рисунок 2.6 – Внешний вид капсул с модификатором

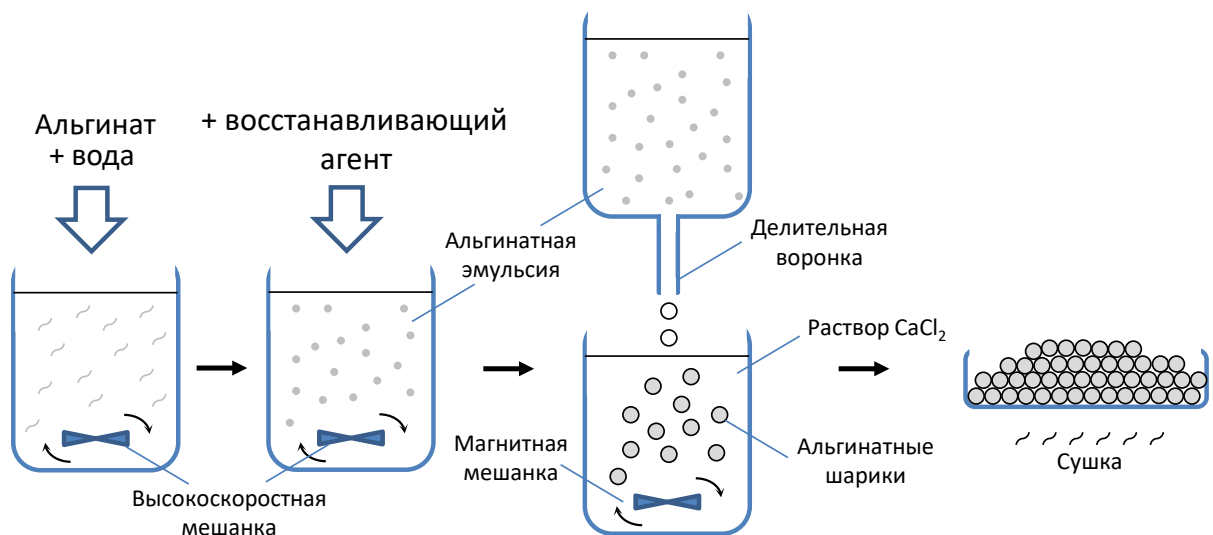


Рисунок 2.7 – Схема синтеза капсулированного модификатора

Приготовление раствора кальциевой соли осуществляется в смесителе принудительного действия до полного растворения  $\text{CaCl}_2$  в воде. Для приготовления альгинатной эмульсии в воду сначала добавляется альгинат натрия, которые смешиваются высокоскоростным смесителем (не менее 2000 об/мин), после чего в полученный раствор добавляется восстанавливающий агент, который в процессе интенсивного смешивания преобразуется в эмульсию. Полученная эмульсия с помощью делительной воронки делится на отдельные частицы (альгинатные шарики), которые закрепляются ионами кальция, проходя через ванну с раствором кальциевой соли. На заключительном этапе альгинатные шарики подвергаются сушке до постоянной массы при температуре 50 °С.

Для исследования влияния структурных особенностей в процессе структурообразования альгинатной эмульсии и его влияния на реологические свойства, изготавливались образцы водных эмульсий с различным содержанием альгината натрия и восстанавливающего агента.

Альгинатная эмульсия получается при смешивании альгината натрия и восстанавливающего агента в воде в различных пропорциях и перемешивался в течение 2 минут с помощью верхнеприводной мешалки со скоростью вращения привода не менее 2000 об/мин [144].

Динамическая вязкость эмульсии определялась на ротационном вискозиметре MCR 101, Anton Paar (Австрия) с применением измерительной системы коаксиальные цилиндры (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Измерительная система коаксиальных цилиндров

Динамическая вязкость определялась при постоянной скорости сдвига  $50 \text{ с}^{-1}$  и температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Значение вязкости рассчитывали как среднее арифметическое 10 измерений при заданных условиях. На следующем этапе для определения предела текучести измеряли напряжение сдвига при увеличении скорости сдвига до  $3500 \text{ с}^{-1}$ . Предел текучести определяли по схеме, представленной на рисунке 2.9.

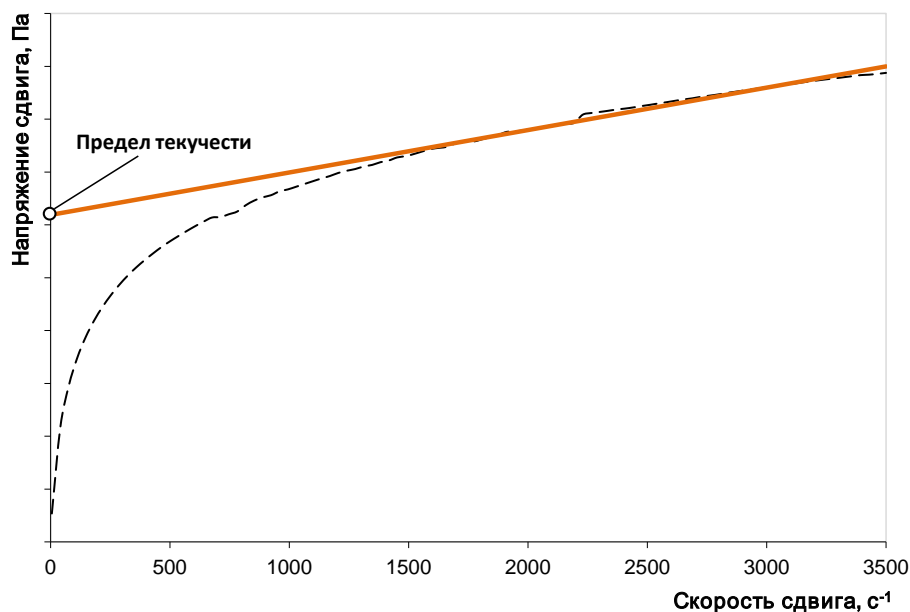


Рисунок 2.9 – Схема определения предела текучести

Структурные параметры альгинатных эмульсий изучали с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse MA200 с использованием программного обеспечения Thixomet с калиброванными электронными приборами и весами. Геометрические параметры структуры альгинатных эмульсий измеряли при увеличении в 200 раз.

Изменение массы образцов альгинатной эмульсии измеряли каждые 24 часа в течение 18 дней с помощью электронных весов с точностью до 0,001 грамма. Образцы альгинатных эмульсий хранили в химическом стакане без крышки в естественных условиях при температуре  $24 \pm 0,1$  °C и влажности воздуха 50 %.

Поверхностное натяжение определялось на процессорном тензиометре KRUSS (Германия) с применением метода пластины Вильгельми. Расчет поверхностного натяжения производился на основании измеряемой силы  $F$ , длины смачиваемой поверхности  $L$  и краевого угла смачивания  $\theta$ :

$$\sigma = \frac{F}{L \cdot \cos\theta} \quad (2.1)$$

Измерения поверхностного/межфазного натяжения осуществлялись в диапазоне 5...100 мН/м.

### **2.2.2 Методика оценки самовосстанавливающей способности асфальтобетона**

В настоящий момент не существует единой методики оценки степени самовосстановления материалов, в том числе асфальтобетонов. Традиционно исследователи используют коэффициент изменения структурно-чувствительного показателя до и после самовосстановления. Так же нет единого мнения, по какому из показателей целесообразно оценивать эффект самовосстановления.

В работе использовались различные подходы для оценки степени самовосстановления асфальтобетона.

#### **2.2.2.1 Методика оценки собственного потенциала самовосстановления асфальтобетона**

Влияние температуры и структуры вяжущего вещества на способность самовосстановления щебеночно-мастичного асфальтобетона исследовали на образцах-цилиндрах, которые испытывались при двух схемах нагружения для определения предела прочности: при сжатии и изгибе.

Для определения предела прочности при сжатии использовались образцы-цилиндры (диаметр – 71,4 мм, высота – 71,4 мм). Сжатие осуществлялось после термостатирования при температуре 20 °С. Скорость сжатия соответствовала перемещению плиты пресса 3 мм/мин. При нагружении фиксировалась максимальная нагрузка, которую выдерживал образец. Расчет предела прочности при сжатии осуществлялся по формуле:

$$R_c = \frac{P}{S} \cdot 10^{-2}, \quad (2.2)$$

где  $P$  – максимальной нагрузка при сжатии, Н;  $S$  – площадь распределения нагрузки, см<sup>2</sup>,  $10^{-2}$  – коэффициент пересчета в МПа.

Для определения предела прочности при изгибе из стандартных образцов-цилиндров выпиливались полуцилиндры с радиусом и толщиной 35,7 мм. Изгиб осуществлялся после термостатирования при температуре -20 °С. Скорость нагружения соответствовала перемещению плиты пресса 3 мм/мин. При нагружении фиксировалась максимальная нагрузка, которую выдерживал образец. Расчет предела прочности при изгибе осуществлялся по формуле::

$$R_b = \frac{P}{2RT}, \quad (2.3)$$

где  $P$  – максимальная нагрузка при изгибе, Н;  $T$  – ширина образца-полуцилиндра, см,  $R$  – радиус образца-полуцилиндра, см.

После разрушения образцов полуцилиндров, две половинки совмещались, прижимая поверхности разлома, друг к другу с помощью жгутов.

Для восстановления образцы помещались в сушильную камеру. Продолжительность периода восстановления и температура среды задавались в соответствии двухфакторным планом эксперимента.

После периода восстановления образцы повторно испытывались при сжатии или изгибе после предварительного термостатирования при температуре 20 °С и -20 °С, соответственно.

Эффект собственного потенциала самовосстановления использовались подход, учитывающий остаточную прочность, относительно которой рассчитывалась собственный потенциал самозалечивания ( $HP$ ):

$$HP = \frac{R_h - R_1}{R_0} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

где  $R_h$  – прочность после самовосстановления, МПа;  $R_0$  – прочность до самовосстановления, МПа;  $R_1$  – остаточная прочность, МПа.



### 2.2.2.2 Методика оценки самовосстановления асфальтобетона

В работе исследовались самовосстанавливающие свойства, для чего оценивались показатели интенсивности самовосстановления, скорости процесса самовосстановления и стойкости материала после самовосстановления.

#### *Интенсивность самовосстановления асфальтобетона*

Для расчета коэффициента восстановления использовались значения предела прочности при сжатии при температуре 20 °С, полученные при циклическом разрушении и периодах восстановления. Изготовленные образцы асфальтобетона термостатировались в климатической камере при температуре 20 °С в течение не менее 2 часов, после чего испытывались при сжатии со скоростью нагружения 3 мм/мин и определялась максимальная нагрузка при разрушении. После этого образцы в течение 7 дней хранились при температуре 20 °С, затем повторно термостатировались и подвергались сжатию. Испытания включали в себя 4 теста на сжатие и три периода восстановления по 7 суток.

Для оценки восстановительного эффекта в основном используется индекс, отражающий относительное изменение показателя прочности после восстановления [117, 120, 121, 122, 144...146]:

$$NI = \frac{R_h}{R_0} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

где  $NI$  – индекс восстановления;  $R_h$  – показатель прочности после действия восстановителя;  $R_0$  – показатель прочности до действия восстановителя.

Более точным подходом для оценки восстановительного эффекта является учет изменения потери прочности асфальтобетона при использовании капсулированного модификатора. Учитывая, что индекс потери прочности представляет собой величину обратную индексу восстановления, который будет рассчитываться как  $1 - R_h/R_0$ . Таким образом, коэффициент восстановления, учитывающий относительную разницу потери прочности асфальтобетона с примени-

ем капсулированного модификатора и без него, рассчитывается по следующей формуле:

$$k_h = \frac{IR'}{IR} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

где  $IR'=1-R'_h/R'_0$  – индекс потери прочности асфальтобетона без капсул;  $IR=1-R_h/R_0$  – индекс потери прочности асфальтобетона с капсулированным модификатором;  $R'_0$  и  $R_0$  – показатель прочности асфальтобетона до восстановления без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно, МПа;  $R'_h$  и  $R_h$  – показатель прочности асфальтобетона после восстановления без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно, МПа.

#### *Скорость самовосстановления асфальтобетона*

Для оценки скорости протекающего процесса самовосстановления в асфальтобетоне осуществлялось изготовление образцов-цилиндров по стандартной технологии. Изготовленные образцы асфальтобетона термостатировались в климатической камере при температуре 20 °С в течение не менее 2 часов, после чего испытывались при сжатии со скоростью нагружения 3 мм/мин и определялась максимальная нагрузка при разрушении. Испытанные образцы разделялись на серии, которые хранились при температуре 20 °С в течение 1 дня, 3 и 7 суток. После истечения периода хранения образцы соответствующей серии повторно термостатировались и подвергались испытанию на сжатие.

Далее полученные значения предела прочности при сжатии использовались для установления кинетики изменения относительной прочности  $R_i/R_0$  и регрессионного анализа. Полученные эмпирические коэффициенты  $a$  в регрессионной математической модели  $f(t)=a\ln(R_i/R_0)+b$ , отражающие скорость изменения  $f(t)$ , использовались для оценки относительной скорости самовосстановления.

### *Стойкость асфальтобетона после самовосстановления*

С целью установления стойкости асфальтобетона после самовосстановления образцы-цилиндры подвергались повторным испытаниям на сжатие для оценки времени достижения критического значения структурно-чувствительного параметра.

Изготовленные образцы асфальтобетона термостатировались в климатической камере при температуре 20 °С в течение не менее 2 часов, после чего испытывались при сжатии со скоростью нагружения 3 мм/мин и определялась максимальная нагрузка при разрушении. После этого образцы в течение 7 дней хранились при температуре 20 °С, затем повторно термостатировались и подвергались сжатию. Испытания включали в себя 4 теста на сжатие и три периода восстановления по 7 суток.

Далее полученные значения предела прочности при сжатии использовались для установления кинетики изменения относительной этого показателя и регрессионного анализа.

Полученные эмпирические коэффициенты уравнений регрессионной математические модели  $f(t)=b_1x+b_0$ , использовались для оценки времени достижения критического значения  $R_{кр}$ , которое принималось в соответствии с ГОСТ 31015-2002. Стойкость структуры асфальтобетона после самовосстановления оценивалась с помощью коэффициента выхода из строя, который рассчитывался:

$$k_{Д} = \frac{(b'_0 - R_{кр}) \cdot b_1}{b'_1 \cdot (b_0 - R_{кр})}, \quad (2.7)$$

где  $R_{кр}$  – критическое значение структурно-чувствительного параметра (предела прочности при сжатии), принято для расчета 2,2 МПа;  $b_i$  и  $b'_i$  – коэффициенты уравнения регрессии  $f(x)=b_1 \cdot x + b_0$ , описывающих снижение прочности для ЩМА без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно.

## **2.3 Математические методы планирования эксперимента и анализа результатов исследования**

Регрессионный анализ экспериментальных данных выполнен исходя из принципа максимального правдоподобия в предположении о нормальном распределении ошибок измерений. Определение параметров регрессионных (экспериментально-статистических) моделей (линейных по параметрам) выполнялось в соответствии с матричным соотношением [147, 148]:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (2.8)$$

где **B** – вектор-столбец параметров; **X** – матрица базисных функций; **Y** – вектор-столбец откликов.

### **2.3.1 Системный анализ: декомпозиция системы критериев качества, выявление управляющих рецептурных и технологических факторов, алгоритм синтеза материала**

#### *Декомпозиция системы критериев качества*

В мировой практике целью научных исследований в области асфальтобетона считается поиск научно обоснованных технологических решений, позволяющих снизить затраты на обслуживание и увеличить продолжительность межремонтных периодов на автомобильных дорогах [149...152]. Известно, что повышение прочности асфальтобетона не приводит к однозначному увеличению его стойкости к различным эксплуатационным и погодно-климатическим факторам [153...155]. Кроме того, повышение прочности асфальтобетона при положительных температурах закономерно приводит к увеличению прочности при отрицательных температурах [156...160]. Указанное достаточно точно описывается в рамках классических представлений о композиционных материалах (структурной модели), в которых на границе раздела фаз «вяжущее вещество – дисперсная фаза» формируется

слой вяжущего с повышенными показателями физических свойств (пленочная фаза) [54]:

$$R = \sigma_s(1 - v_p) - \sigma_s v_f (1 - \rho_f S_a h_0 (k_m - 1)) + \sigma'_f v_f \quad (2.9)$$

где  $\sigma_s$  – коэффициент, характеризующий прочность вяжущего вещества;  $\sigma'_f$  – коэффициент, характеризующий влияние дисперсной фазы;  $v_f$  – объемная доля дисперсной фазы;  $v_p$  – объемная доля воздушных пор;  $\rho_f$  – средняя плотность дисперсной фазы;  $S_a$  – площадь удельной поверхности дисперсной фазы;  $k_m$  – коэффициент упрочнения вяжущего в адсорбционном состоянии;  $h_0$  – оптимальная величина толщины вяжущего.

Уменьшение прочности композита наблюдается при снижении толщины вяжущего меньше оптимальной величины  $h_0$ . В этом случае предполагается, что снижение прочности композита происходит вследствие повышения его пористости из-за недостатка вяжущего и образования агрегатов, состоящих только из частиц дисперсной фазы и воздуха [54]:

$$R = \sigma_s \left[ 1 - v_p - v'_f \left( 1 - \frac{1 - v_{f,pppt}}{v_{f,opt}} \right) (k_m - 1) \right] + \sigma'_f v_f \quad (2.10)$$

где  $v'_f = 2v_{f,opt} - v_f$ ;  $v_{f,opt}$  – объемная степень заполнения дисперсной фазой, при которой наблюдается экстремум прочности; оптимальная доля дисперсной фазы.

Адекватность указанной модели подтверждена в [161]. При прочих равных условиях управляющими параметрами модели композита являются величина  $k_m$ , характеризующая превышение прочности пленочной фазы вяжущего вещества, и оптимальная толщина слоя вяжущего  $h_0$ . В [35] представлена методика определения толщины адсорбционного слоя битума по результатам реологических испытаний. Из (2.8) и (2.9), а также из представления  $h_0 > 2h_a$

(здесь  $h_a$  – толщина адсорбированного слоя битума) следует, что в зависимости от физико-химических свойств дисперсной фазы в асфальтобетоне формируется определенный баланс между битумом, находящимся в адсорбированном и в объемном состоянии. Установление такого баланса требует дополнительных исследований по структуре прослойки битума, находящегося между частицами дисперсной фазы. Для обеспечения обволакивания зерен минеральной части асфальтобетона при заданной технологии его изготовления необходимый минимальный объем битума равен:

$$V_{min} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{n\sqrt{R_e}} \pi d_i^2 \right) \quad (2.11)$$

где  $R_e$  – число Рейнольдса;  $d_i$  – диаметр зерен минеральной части соответствующей  $i$ -ой фракции.

Безусловно, этот баланс между содержанием свободного и адсорбированного битума должен оказывать влияние и на эксплуатационные свойства. Как правило, вещество в адсорбционном состоянии характеризуется другими показателями свойств (увеличивается плотность, снижаются величины фазовых переходов I рода и др.), увеличивается плотность упаковки молекул и ограничивается их подвижность, что эквивалентно снижению «структурной температуры»<sup>1</sup> вещества. Это позволяет предполагать, что в адсорбированном состоянии сопротивляемость битума к воздействию физических и химических факторов будет выше по сравнению с битумом в объемном (свободном) состоянии.

Для асфальтобетона указанное означает, что между прочностью при положительных температурах и трещиностойкостью (прочностью при отрицательных температурах) также должен установиться некоторое соотношение, которое является важным и доступным условием обеспечения долговечности. Долговечность, представляемая максимальным возможным

---

<sup>1</sup> Данное понятие широко используется в теории растворов.

сроком эксплуатации асфальтобетонного покрытия, в период которого сохраняется его эксплуатационная пригодность и не осуществляется его ремонт или восстановление, достигается за счет неизменности или постоянства состояния структуры материала, которое в течение времени обеспечивает способность в равной степени выдерживать влияние внешних воздействий без образования дефектов. При этом в процессе эксплуатации дорожного покрытия под воздействием погодных-климатических факторов и нагрузки от автомобильного транспорта в асфальтобетоне происходят необратимые процессы, приводящие к образованию дефектов и нарушению сплошности структуры.

Долговечность асфальтобетона обратно пропорциональна скорости протекания деструктивных процессов и их интенсивности. Таким образом, для обеспечения увеличения сроков службы асфальтобетонного покрытия необходим поиск научно обоснованных решений, позволяющих в период эксплуатации обеспечить длительность состояния структуры асфальтобетона без дефектов за счет придания ему уникальных свойств, позволяющих самостоятельно восстанавливать целостность композита и его способность сопротивляться внешним воздействующим факторам.

Обеспечение долговечности асфальтобетонного покрытия возможно за счет использования капсулированного модификатора, позволяющего при образовании дефектов обеспечить восстановление целостности композита и его способности сопротивляться внешним воздействиям [162].

Увеличение долговечности асфальтобетонного покрытия, возможно за счет использования технологии самовосстановления, реализация которой осуществляется с применением капсулированного модификатора. Капсулы, содержащие модификатор, добавляются в асфальтобетонную смесь на заключительной стадии приготовления и в период начального структурообразования выступают в качестве инертного наполнителя. При этом температура приготовления асфальтобетонной смеси не должны оказывать

деструктивного воздействия на оболочку капсул и капсулированный модификатор. Материал оболочки капсул должен обеспечивать их целостность в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси, предотвращая преждевременную декапсуляцию (высвобождения) модификатора.

В процессе эксплуатации дорожного покрытия под воздействием эксплуатационных факторов в асфальтобетоне происходит нарушение сплошности структуры (образование трещин и других дефектов). Механизм высвобождения модификатора из капсул инициируется процессами дефектообразования (нарушения сплошности структуры), приводящими к нарушению целостности капсулы. Модификатор через образовавшийся дефект в оболочке способен частично заполнять пространство трещины, смачивать ее стенки, в процессе диффузии проникать в битум.

Дальнейший процесс восстановления целостности композита и его способности сопротивляться внешним воздействиям осуществляется за счет вторичного локального структурообразования, которое происходит при полимеризации модификатора. Полимеризация модификатора осуществляется при взаимодействии с отвердителем, который в процессе изготовления капсул наносится на их внешнюю поверхность и/или присутствует в объеме битума в виде инертной добавки.

Таким образом, с использованием капсулированного модификатора за счет образования на конце трещины полимеризованного участка вяжущего обеспечивается ее купирование и остановку дальнейшего развития. Также образовавшиеся локальные участки полимер-битумного вяжущего в объеме асфальтобетона, предположительно способны за счет своей большей эластичности в большей степени рассеивать динамическую нагрузку от движущегося автомобильного транспорта. Рассмотренный пример реализации технологии самовосстановления является наиболее перспективным в области дорожного строительства, формулирование научных и практических основ,



создания которой при применении позволит увеличить срок эксплуатации автомобильных дорог.

Установление и описание основных критериев эффективности самовосстанавливающихся асфальтобетонов осуществлялось с использованием модели оценки и прогнозирования эксплуатационного состояния дорожного покрытия, в основе которой лежит расчет индекса эксплуатационного состояния (Pavement Condition Index (PCI)). Расчет рассмотренного индекса базируется на положениях [163]:

- показатель должен отражать циклический характер как природно-климатических, так и силовых воздействий;
- показатель должен учитывать неоднородность запаса прочности на циклические природно-климатические, так и силовые воздействия;
- количество циклов воздействия природно-климатических и силовых факторов принимается пропорциональное времени эксплуатации дорожного покрытия.

Оценка эксплуатационного состояния покрытия по показателю PCI осуществляется по шкале от 0 («Failed») до 100 («Good») и рассчитывается по формуле [164]:

$$q(t) = PCI(t) = 100 \cdot \Phi \cdot \frac{1}{c} \left( 1 - \left( \frac{t}{T} \right)^{\frac{1}{b}} \right), \quad (2.12)$$

где  $\Phi(x)$  – интеграл вероятности, для которого имеются подробные таблицы и приближенные формулы;  $t$  – срок эксплуатации, год;  $T$  – период, за который качество снизится вдвое, год;

$b = 2,5 \dots 3,5$  – коэффициент, характеризующий сопротивление материала динамическим нагрузкам;  $c = 0,16 \dots 0,20$  – коэффициент вариации, отражающий неоднородность запаса прочности.

Качество самовосстанавливающегося асфальтобетона определяется параметрами начальной структуры материала и показателями, отражающими его состояние в начальный период эксплуатации (рисунок 2.10).

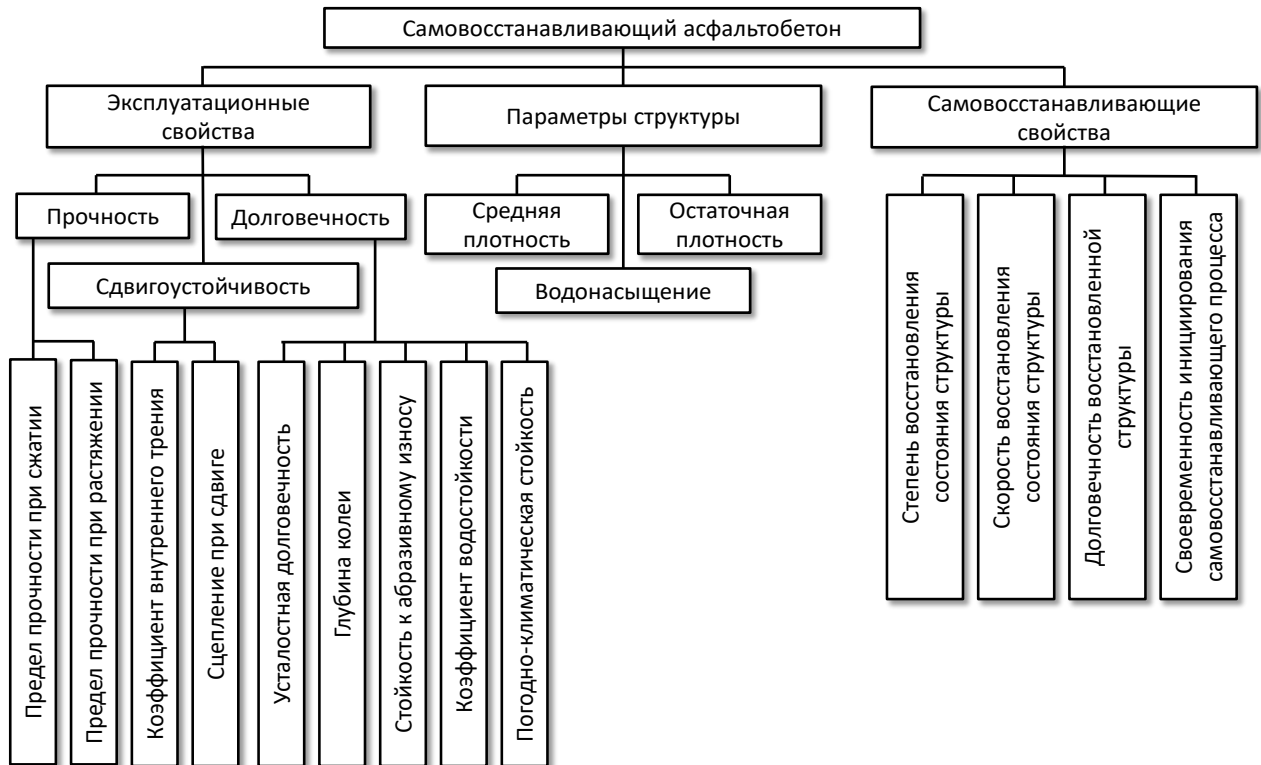


Рисунок 2.10 – Показатели качества самовосстанавливающегося асфальтобетона

Показателями, предусмотренные нормативными документами (ГОСТ 12801-98), которые характеризуют структуру, являются средняя плотность, водонасыщение и остаточная пористость, а отражающими состояние структуры являются показатели прочности и сдвигоустойчивости. При этом в систему критериев также включены показатели, отражающие способность асфальтобетона сопротивляться циклическим силовым нагрузкам и воздействиям погодно-климатических факторов [165].

Способность асфальтобетона самостоятельно восстанавливать состояние структуры или улучшать эксплуатационное состояние материала является существенным признаком, по которому определяется эффективность технологии самовосстановления. Практическая значимость использования

технологии самовосстановления заключается в обеспечении восстановления способности асфальтобетона сопротивляться внешним воздействующим факторам без дополнительных энергетических и финансовых затрат.

В качестве характеристик, позволяющих оценить способность восстановления эксплуатационного состояния асфальтобетона с помощью технологии самовосстановления, являются:

- степень восстановления эксплуатационного состояния структуры;
- своевременность инициирования процесса самовосстановления;
- скорость процесса восстановления эксплуатационного состояния структуры;
- долговечность эксплуатационного состояния после самовосстановления.

Очевидно, что основным критерием эффективности технологии самовосстановления является степень восстановления эксплуатационного состояния структуры ( $\Delta q$ ), которое обеспечивается процессом вторичного структурообразования с помощью капсулированного модификатора, которое достигается выполнением равенства  $q_1 + \Delta q = q_0$  (рисунок 2.11).

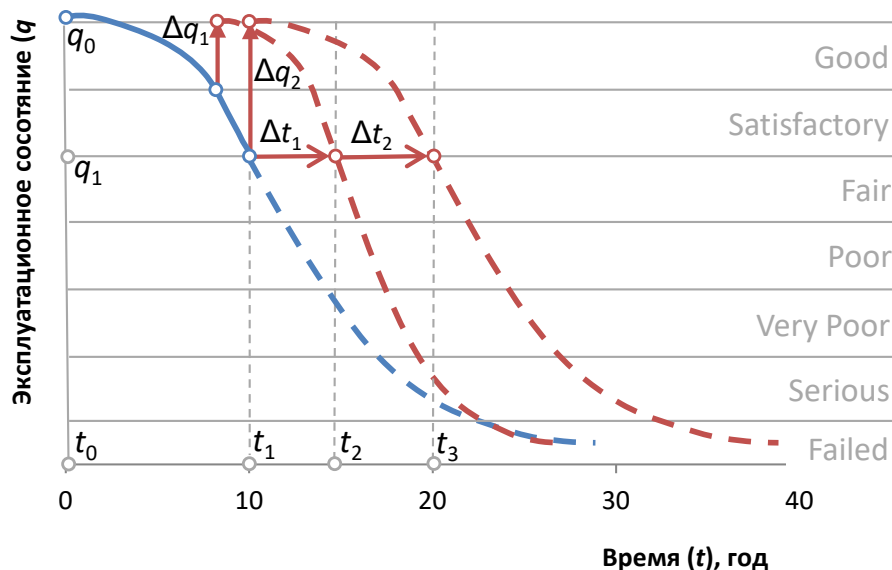


Рисунок 2.11 – Влияние эффективности и своевременность восстановления на эксплуатационное состояние

Необходимо отметить, что максимальная эффективность восстановления эксплуатационного состояния достигается при своевременном инициировании этого процесса и при выполнении условия  $\Delta q = q_0 - q_1$ . При этом процесс восстановления эксплуатационного состояние должен быть инициирован в пределах, когда состояние покрытия позволяет безопасное и комфортное эксплуатирование, так как при достижении состояния «Fair» дорожными службами организуются мероприятия по ремонту покрытия.

Учитывая, что восстановление эксплуатационного состояния происходит в результате реакции взаимодействия модификатора из капсулы с внешней средой, то эффективность самовосстановления будет обратно пропорциональна скорости этого процесс (рисунок 2.12).

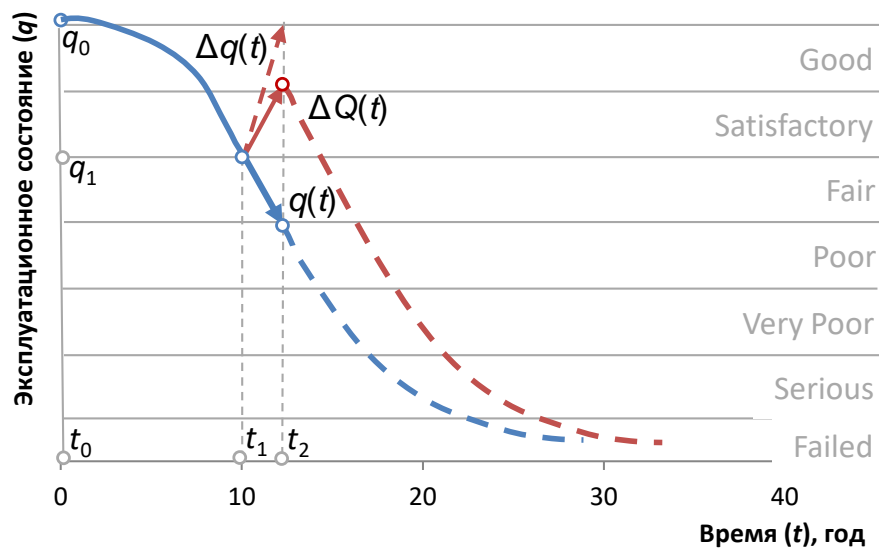


Рисунок 2.12 – Влияние скорости восстановления на эксплуатационное состояние

Таким образом, в случае некоторой длительности процесса самовосстановления асфальтобетона зависимость изменения эксплуатационного состояния от времени будет представляться как функция  $\Delta q(t)$ . Однако при разработке технологии самовосстановления необходимо учитывать тот факт, что за время восстановления на эксплуатационное состояние оказывают влияние деструктивные процессы  $q(t)$ , которые снижают

итоговую эффективность на момент завершения процесса. В таком случае изменение состояния будет определяться суммой разнонаправленных процессов  $\Delta Q(t) = \Delta q(t) - q(t)$ . То есть для обеспечения эффективности технологии самовосстановления скорость восстановления эксплуатационного состояния должна быть больше или равна скорости деструктивных процессов.

Процесс восстановления эксплуатационного состояния материала завершается формированием новой структуры асфальтобетона, качество которой будет определять эффективность технологии самовосстановления (рисунок 2.13).

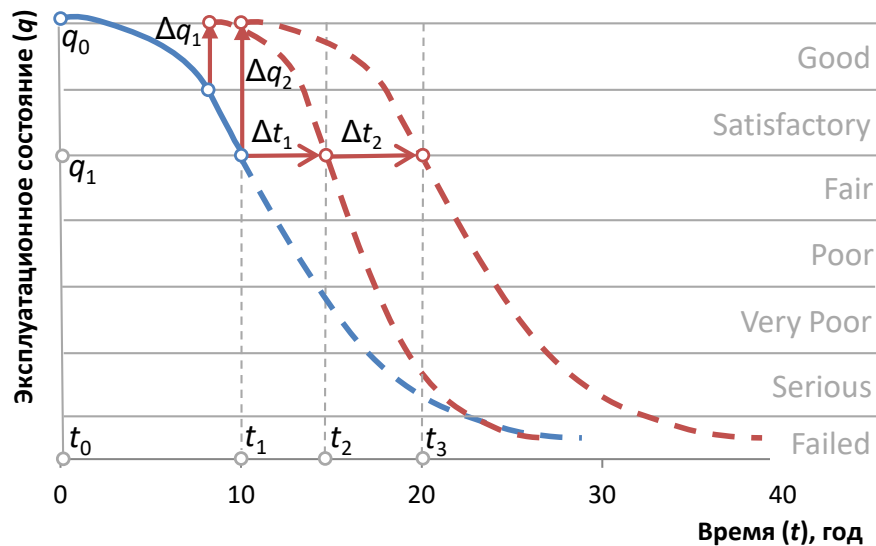


Рисунок 2.13 – Влияние долговечности структуры после процесса самовосстановления на эксплуатационное состояние

Очевидно, что увеличение безремонтного срока эксплуатации дорожного покрытия прямо пропорционально зависит от качества сформированной в результате процесса самовосстановления комбинированной структуры асфальтобетона и ее способности сопротивляться внешним воздействиям.

Способность асфальтобетона самостоятельно восстанавливать состояние структуры или улучшать эксплуатационное состояние материала является существенным признаком, по которому определяется эффективность технологии самовосстановления. Показателями, которые отражают степень эффективности

разрабатываемой технологии самовосстановления, являются степень восстановления эксплуатационного состояния структуры, своевременность инициации процесса самовосстановления; скорость процесса восстановления, а также долговечность эксплуатационного состояния после самовосстановления.

*Выявление управляющих рецептурных и технологических факторов*

Управление структурообразование строительных материалов, в том числе асфальтобетонов, осуществляется за счет регулирования рецептурных и технологических факторов. Стоит учитывать, что степень влияния каждого из факторов может значительно отличаться, поэтому целесообразно классифицировать рецептурные и технологические факторы на управляющие. Декомпозиция экстенсивных и интенсивных свойств до элементарных факторов позволяет определить и присвоить соответствующие ранги управляющим факторам [166].

Декомпозиция экстенсивных свойств самовосстанавливающегося асфальтобетона – свойства, на величину которых ключевое влияние оказывает содержание компонентов – представлена в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Декомпозиция экстенсивных свойств самовосстанавливающегося асфальтобетона

№	Группа	Свойство
1	2	3
Технологические		
1	Энергозатраты при совмещении компонентов	Продолжительность смешивания
		Скорость смешивания
		Температура компонентов
2	Энергозатраты при перемешивании компонентов	Продолжительность перемешивания
		Объем смесителя
		Скорость вращения ротора
3	Энергозатраты при формировании структуры	Продолжительность остывания
		Скорость остывания
		Интенсивность теплоотдачи

Продолжение таблицы 2.11

1	2	3
Рецептурные		
1	Вязущее вещество	Объемная доля
2	Дисперсная фаза	Объемная доля
		Дисперсность
3	капсулированный модификатор	Концентрация модификатора

Интенсивные свойства (рисунок 2.14) зависят как от рецептуры, согласно которой изготавливается материал, так и формирующейся структуры композиты, то есть интенсивности физико-химических процессов структурообразования материала.

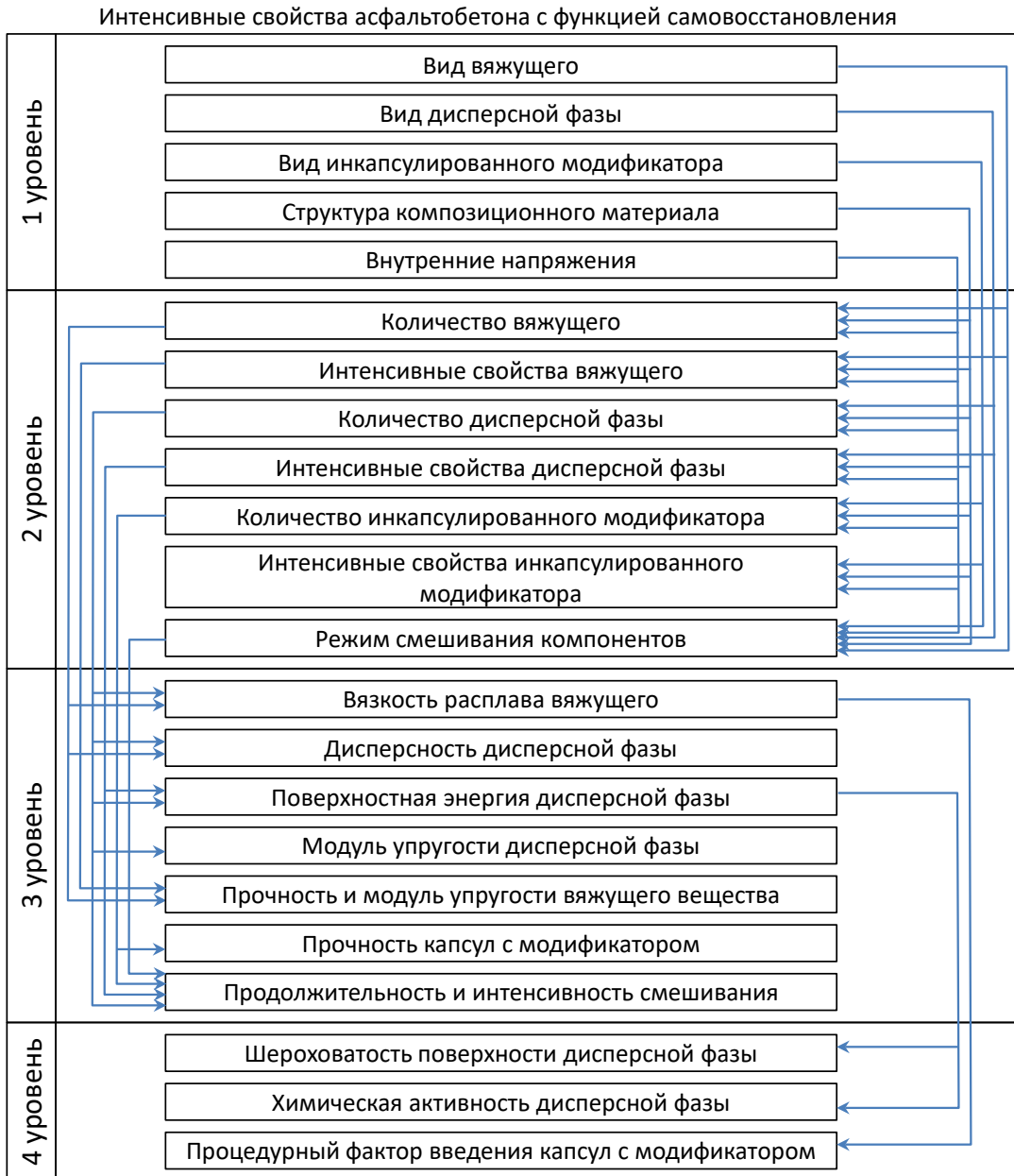


Рисунок 2.14 – Декомпозиция интенсивных свойств асфальтобетона с функцией самовосстановления

В таблице 2.12 представлены элементарные управляющие рецептурные и технологические факторы, оказывающие ключевое влияние на показатели качества и технологический процесс изготовления самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором.



Таблица 2.12 – Перечень элементарных управляющих рецептурных и технологических факторов

Уровень	Факторы			
	Рецептурные		Технологические	
	№	Наименование	№	Наименование
II	1	Вид и количество компонентов: вяжущее, минеральная фаза, капсулированный модификатор	1	Режим перемешивания, температура сырьевой смеси
III	1	Дисперсность минеральной фазы	1	Продолжительность и интенсивность перемешивания компонентов
	2	Вязкость вяжущего и модуль упругости минеральной фазы		
	3	Поверхностная энергия дисперсной фазы		
IV	1	Химическая активность дисперсной фазы и модификатора	1	Шероховатость поверхности наполнителя

#### *Алгоритм синтеза материала*

Строительные материалы, в том числе асфальтобетоны, представляют собой сложные технические системы [166], процесс создания которых состоит из нескольких последовательных производственных этапов: подбор основных компонентов; выбор управляющих факторов (рецептурных и технологических); установление зависимостей влияния управляющих факторов на показатели качества (выявленные при декомпозиции); многокритериальная оптимизация состава и технологии получения материала с заданными показателями качества.

Для самовосстанавливающегося асфальтобетона процесс синтеза можно представить в виде следующего алгоритма:

– постановка цели и задач исследования, основанные общих принципах проектирования асфальтобетона, способах реализации технологии самовосстановления в материал различного назначения, теоретических предпосылках реа-

лизации самовосстановления в асфальтобетонах, технико-экономического обоснования использования капсулированных модификаторов;

- на основе анализа эксплуатационных факторов выделяются показатели качества самовосстанавливающегося асфальтобетона (декомпозиция системы критериев качества);

- с применением знаний фундаментальных наук о механизме взаимодействия модификатора (восстанавливающего агента) и битумной матрицы, а также по результатам проектирования зернового состава минеральной части материала проводится выбор компонентов;

- проводится классификация и ранжирование управляющих факторов на основе полученных закономерностей формирования структуры и изменения свойств;

- устанавливаются закономерности влияния управляющих факторов на собственный потенциал самовосстановления, а также влияния капсулированного модификатора на самовосстановление и другие показатели качества асфальтобетона;

- на основе полученных экспериментально-статистических моделей осуществляется многокритериальная оптимизация состава самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором.

### **2.3.2 Статистический анализ экспериментальных данных**

Для обработки получаемых в результате эмпирических исследований данных использовались первичные статистические методы, в результате которых рассчитывались показатели среднего арифметического значения и дисперсии.

Среднеарифметическое (или выборочное среднее) значение представляет собой среднюю оценку исследуемого в эксперименте показателя, которое определяется по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n), \quad (2.13)$$

где  $x_i$  – значение исследуемого показателя;  $n$  – количество испытаний для определения показателя.

Для описания вариативности получаемых в результате эмпирических исследований данных используется мера разброса, которая характеризует степень отклонения получаемых значений от центральной тенденции. Мерой, которая учитывает разность каждого получаемого значения и среднеарифметического значения является дисперсия. Дисперсия определяется по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}. \quad (2.14)$$

Для выявления статистических закономерностей полученных данных с учетом результатов первичной статистической обработки использовались вторичные методы статистической обработки.

Для количественной оценки соответствия получаемых значений осуществлялся корреляционный анализ, с помощью расчета коэффициента корреляции (детерминации), отражающего связь между переменными и направление этой связи.

Анализ полученных экспериментальных данных и исключение данных, значительно отличающиеся от среднего значения, проводился с применением критерия Шовене в соответствии с методикой [167].

### 2.3.3 Многокритериальная оптимизация

Эффективность самовосстанавливающегося асфальтобетона оценивается изменением качества, представляемой комплексной характеристикой, учитывающей как показатели свойств в соответствии с нормативными требованиями, так и показатели, отражающие уникальные свойства материала, в том числе самовосстановление. Оценка эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором использовались методы системного анализа и многокритериальной оптимизации. В работе учет указанных показателей свойств осуществлялся с применением соответствующих критериев качества (таблица 2.14).

Таблица 2.14 – Критерии качества самовосстанавливающегося асфальтобетона

Показатель	Формула	Примечание
1	2	3
Критерий прочности при температуре 20 °С	$k_{R20} = \frac{R'_{20}}{R_{20}}$	$R_{20}'$ и $R_{20}$ – предел прочности при сжатии при 20 °С разработанного ЩМА и контрольного
Критерий прочности при температуре 50 °С	$k_{R50} = \frac{R'_{50}}{R_{50}}$	$R_{50}'$ и $R_{50}$ – предел прочности при сжатии при 20 °С разработанного ЩМА и контрольного
Критерий трещиностойкости при температуре 0 °С	$k_{тр} = \frac{R_{опт} -  R'_0 - R_{опт} }{R_{опт} -  R_0 - R_{опт} }$	$R_0'$ , $R_0$ и $R_{опт}$ – предел прочности при расколе при 0 °С разработанного ЩМА, контрольного и оптимального; $R_{опт} = 4,25$ МПа
Критерий водонасыщения	$k_W = \frac{W_0}{W'}$	$W'$ и $W_0$ – водонасыщение разработанного ЩМА и контрольного

Продолжение таблицы 2.14

1	2	3
Критерий водостойкости	$k_B = \frac{k_{\text{ВДСТ}}}{k'_{\text{ВДСТ}}}$	$k_{\text{ВДСТ}}$ и $k'_{\text{ВДСТ}}$ – коэффициент водостойкости разработанного ЩМА и контрольного
Критерий сдвиговой устойчивости	$k_{\text{СДВ}} = \frac{C'_{\text{Л}} \text{tg}\varphi'}{C_{\text{Л}} \text{tg}\varphi}$	$C_{\text{Л}}$ и $C'_{\text{Л}}$ – сцепление при сдвиге при 50 °С разработанного ЩМА и контрольного; $\text{tg}\varphi'$ и $\text{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения при 50 °С разработанного ЩМА и контрольного
Критерий самовосстановления	$k_{\text{SH}} = \frac{k'_h}{k_h}$	$k'_h$ и $k_h$ – коэффициент самовосстановления разработанного ЩМА и контрольного
Критерий скорости самовосстановления	$k_V = \frac{k'_v}{k_v}$	$k'_v$ и $k_v$ – коэффициент скорости самовосстановления разработанного ЩМА и контрольного
Критерий стойкости после самовосстановления	$k_D = \frac{k'_d}{k_d}$	$k'_d$ и $k_d$ – коэффициент выхода из строя разработанного ЩМА и контрольного

Оценка эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором проводилась по обобщённому критерию качества, с помощью аддитивно-мультипликативной функции вида:

$$F_k = \alpha_1 K_{\text{ФМ}} + \alpha_2 K_{\text{ЭК}} + \alpha_3 K_{\text{СВ}}, \quad (2.15)$$

где  $K_{\Phi M} = \sqrt[3]{k_{R20}k_{R50}k_{\text{тр}}}$  – мультипликативная функция (коэффициент), характеризующая физико-механические свойства (предел прочности при сжатии при 20 и 50 °С, предел прочности на растяжение при расколе при 0 °С);  $K_{\text{ЭК}} = \sqrt[3]{k_W k_B k_{\text{СДВ}}}$  – мультипликативная функция (коэффициент), характеризующая эксплуатационные свойства (водонасыщение, водостойкость, коэффициент внутреннего трения, показатель сцепления при сдвиге при 50 °С);  $K_{\text{СВ}} = \sqrt[3]{k_{\text{SH}} k_V k_D}$  – мультипликативная функция (коэффициент), характеризующая самовосстанавливающие свойства (интенсивность самовосстановления, скорость самовосстановления и показатель выхода из строя);  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  – коэффициенты весомости.

Технико-экономическая эффективность разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором оценивалась с учетом относительного изменения стоимости:

$$k_{ef} = \frac{F_k}{C_k}, \quad (2.16)$$

где  $F_k$  – обобщенный критерий качества;  $C_k$  – относительное изменение качества.

### ГЛАВА 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА И СВОЙСТВА КАПСУЛИРОВАННОГО МОДИФИКАТОРА

#### 3.1 Выбор восстанавливающего агента капсулированного модификатора для самовосстанавливающегося асфальтобетона

Эффективность действия восстанавливающего агента в асфальтобетона зависит не только от его химической природы, но и от степени его совместимости с битумным вяжущим. Чем более растворимы друг в друге компоненты системы, тем интенсивней протекает процесс взаимодействия между ними и тем больший эффект достигается при декапсуляции залечивающего агента. На практике определение совместимости веществ требует значительных материальных и временных затрат, поэтому теоретические методы определения растворимости имеют очевидные преимущества.

Существуют различные расчетные методы, которые позволяют определить совместимость веществ в смесях из двух компонентов. Обязательным условием образования термодинамически устойчивой смеси является уменьшение свободной энергии системы  $\Delta Z$  при смешении компонентов [168]:

$$\Delta Z = \Delta H - T\Delta S < 0, \quad (3.1)$$

где  $\Delta H$  – теплота смешения компонентов;  $\Delta S$  – энтропия смешения компонентов;  $T$  – температура.

Особенностью систем, содержащих высокомолекулярные органические соединения, является большое влияние энтропийного фактора. В соответствии с теорией Флори – Хаггинса изменение энтропии при смешении компонентов может быть определено по уравнению:

$$\Delta S = -R \sum_i^n x_i \ln \Phi_i, \quad (3.2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $x_i$  – число моль  $i$ -го компонента;  $\Phi_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента,  $n$  – количество компонентов в смеси.

Теплоту смешения компонентов бинарной смеси  $\Delta H_m$  при условии отсутствия специфических взаимодействий (сольватации, комплексообразования и др.), согласно теории регулярных растворов, можно определить по уравнению Гильдебранда [169]:

$$\Delta H_m = V_c(\delta_1 - \delta_2)^2\Phi_1\Phi_2, \quad (3.3)$$

где  $V_c$  – объем смеси;  $\delta_i$  – параметр растворимости  $i$ -го компонента.

При смешении взаиморастворимых веществ объем смеси не может быть вычислен как алгебраическая сумма абсолютных объемов компонентов. В этом случае расчет объема смеси проводят по уравнению Гиббса – Дюгема:

$$V_c = \sum_{i=1}^n x_i v_i, \quad (3.4)$$

где  $v_i$  – молярный объем  $i$ -го компонента.

В литературе существует несколько расчетных и экспериментальных методов для определения параметра растворимости. Однако в вопросе определения значений  $\delta_i$  у исследователей нет единого мнения. Значения параметра растворимости для одного вещества, определенные различными методами, сильно различаются (таблица 3.1).



Таблица 3.1 – Методы определения растворимости

Формула	Номер	Примечания
$\delta_i = \sqrt{\frac{\Delta H_v - RT}{V_m}}$	(3.5)	$\Delta H_v$ – теплота испарения вещества; $R$ – газовая постоянная; $T$ – абсолютная температура; $V_m$ – молярный объем
$\delta_i = 4,1 \left( \frac{\sigma_i}{\sqrt[3]{v_i}} \right)^{0,43}$	(3.6)	$v_i$ – молярный объем вещества, $\sigma_i$ – поверхностное натяжение вещества
$\delta_i = \frac{\gamma \sum G}{M}$	(3.7)	$\gamma$ – плотность вещества; $M$ – молекулярная масса вещества (элементарного звена полимера); $\sum G$ – сумма констант притяжения отдельных атомных групп вещества (элементарного звена полимера)

Каждая представленная методика имеет определенные преимущества. Например, вариационные расчеты, проведенные по первой формуле, свидетельствуют о том, что при повышении температуры на каждые 10 °С значение параметра растворимости вещества уменьшаются на 0,1...0,2 %. Поэтому даже при значительных изменениях температуры (до 100 °С) погрешность расчетов, в которых не учитывается непосредственное влияние температуры на изменение параметра растворимости, минимальна.

Использование полуэмпирического метода (вторая формула) предполагает экспериментальное определение поверхностного натяжения вещества, что связано с определенными трудностями, особенно характерными для определения  $\sigma_i$  при повышенных температурах (например, для расплавов термопластов).

Расчетные значения при использовании метода Смолла (формула (3.7)) близки с экспериментальными данными. Однако неизвестно, насколько точно этот метод отражает значения параметра растворимости низкомолекулярных веществ, хотя физическое обоснование метода применимо для обоих типов веществ.

По определению интенсивность межмолекулярного взаимодействия равна потенциальной энергии взаимодействия между молекулами, отнесенная к единице объема вещества и в случае приближения температуры жидкости к температуре кипения эквивалентна работе удаления взаимодействующих молекул на бесконечно большое расстояние, что практически соответствует испарению вещества. Если притяжение молекул обусловлено силами Ван-дер-Ваальса, то параметр растворимости рассчитывается по формуле:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{E}{V_m}}, \quad (3.8)$$

где  $E$  – энергия когезии;  $V_m$  – молярный объем.

Анализ результатов расчета значений параметра растворимости некоторых органических веществ показал, что значения параметра растворимости, вычисленные по уравнениям (3.5)...(3.8), различаются. Близкие по абсолютному значению величины параметра растворимости получаются при расчете по формулам (3.5) и (3.8), а также по формулам (3.6) и (3.7). Это свидетельствует о том, что применены два различных подхода к определению параметра растворимости. Уравнения (3.6) и (3.7) отражают межмолекулярное взаимодействие в конденсированных системах при условии, что температура системы не близка к температуре кипения растворителя. Уравнения (3.5) и (3.8) учитывают энергию, необходимую для удаления молекулы вещества из объема системы на расстояние прекращения действия сил Ван-дер-Ваальса. Поэтому значения параметра растворимости одного и того же вещества, рассчитанные с помощью этих двух подходов, различаются. Поскольку при рассмотрении конденсированных систем при температурах, не близких к температуре кипения растворителя, не требуется учитывать энергию испарения веществ, целесообразно использовать подход, отражаемый уравнениями (3.6) и (3.7). Из двух предложенных методов этого подхода метод Смолла является более приемлемым, т.к. в отличие от

применения формулы (3.6) позволяет использовать расчетные данные, не прибегая к эксперименту.

Параметр растворимости характеризуется интенсивностью межмолекулярного взаимодействия в веществе и равен энергии, затраченной отдаление молекул на расстояние, на котором силами взаимодействия можно пренебречь.

Для залечивающего агента параметр растворимости равен:

$$\delta_m = \sqrt{\frac{E_m \rho_m}{M_m}}, \quad (3.9)$$

где  $E_m$  – энергия испарения залечивающего агента;  $\rho_m$  – плотность залечивающего агента;  $M_m$  – молярная масса залечивающего агента.

Для энергии испарения органических соединений применимо уравнение Тратона:

$$E = kT_b, \quad (3.10)$$

где  $T_b$  – температура кипения;  $k$  – константа, равная 89,12 Дж/(моль·К).

Совместимость залечивающего агента и битума в матрице асфальтобетона характеризуется величиной  $\Delta\delta = |\delta_b - \delta_m|$ , в соответствии с которой гомогенность системы возрастает при  $\Delta\delta \rightarrow 0$ . Отсюда при условии  $\delta_b = \delta_m$  получим:

$$M_m = \frac{kT_b \rho_m}{\delta_b^2}. \quad (3.11)$$

Основные свойства и параметры растворимости, характеризующие способность образования гомогенной системы представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства компонентов и их способность образования гомогенной смеси

Компонент	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$M$ , г/моль	$\delta$ , (Дж/см <sup>3</sup> ) <sup>0,5</sup>	$\Delta\delta$ , (Дж/см <sup>3</sup> ) <sup>0,5</sup>
Битум	0,986	1050	2,7	–
AR-полимер	1,070	3200...3400	2,1	-0,6
Подсолнечное масло	0,918	879	3,9	1,2

На рисунке 3.1 представлены диаграмма растворимости исследуемых залечивающих агентов в битуме в широком диапазоне изменения концентраций.

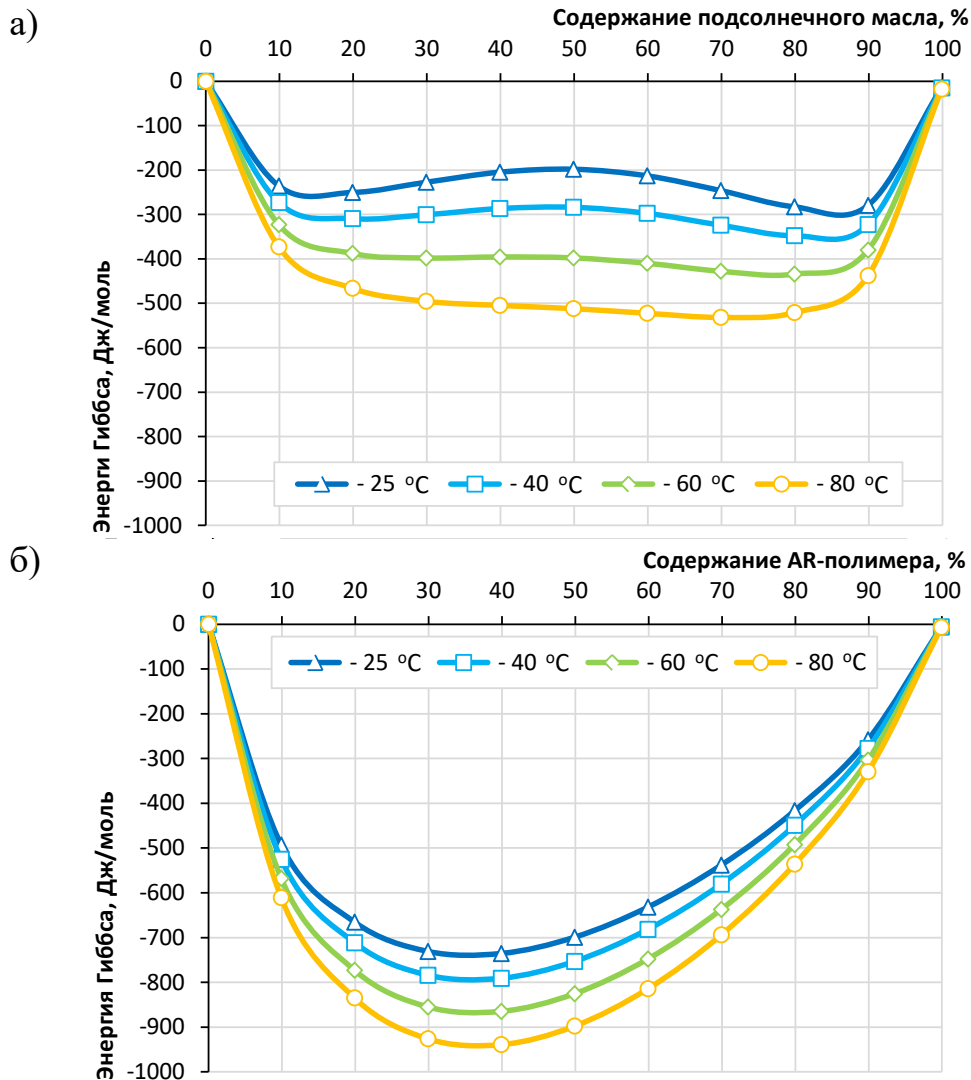


Рисунок 3.1 – Зависимость энергии Гиббса двухкомпонентной системы «Подсолнечное масло–битум» (а) и «AR-полимер–битум» (б) от концентрации залечивающего агента

Анализ данных зависимости энергии Гиббса в двухкомпонентных системах «модификатор–битум» от их концентрации показывает, что AR-полимер, предлагаемые в качестве активного залечивающего агента, обладает способностью к образованию гомогенной системы. Видно, что все двойные системы имеют значение  $\Delta Z < 0$ , свидетельствующее о возможности образования гомогенных систем (растворения компонентов). Наибольшие абсолютные значения имеет система «AR-полимер–битум», а наименьшие – «подсолнечное масло–битум», которые с увеличением температуры также увеличиваются. Повышение температуры обеспечивает формирование гомогенной смеси, что является весьма важно для повышения эффективности самовосстановления и подтверждено многочисленными экспериментами [104, 106, 111, 119, 125].

Важным условиям реализации синтеза капсул с восстанавливающим агентом при использовании альгинатной технологии является способность образовывать технологические смеси в виде эмульсий.

### **3.2 Технологические свойства смесей для синтеза капсулированного модификатора**

Основным технологическим свойством, в соответствии с технологией капсуляции, обеспечивающим формирование капсул с заданными размерами и толщиной стенки, является реологические свойства. Установление способности различных по составу альгинатных суспензий сопротивляться течению позволит установить наличие структурирующего эффекта, который оказывает восстанавливающий агент.

Для изучения влияния рецептурных факторов на геометрические параметры и реологические свойства альгинатных эмульсий, а также для установления интенсивности влияния подсолнечного масла на их структурообразование.

Исследование влияния подсолнечного масла на вязкость оценивалось на составах эмульсий с различным содержанием альгината натрия, результаты которого отражены на рисунке 3.2.

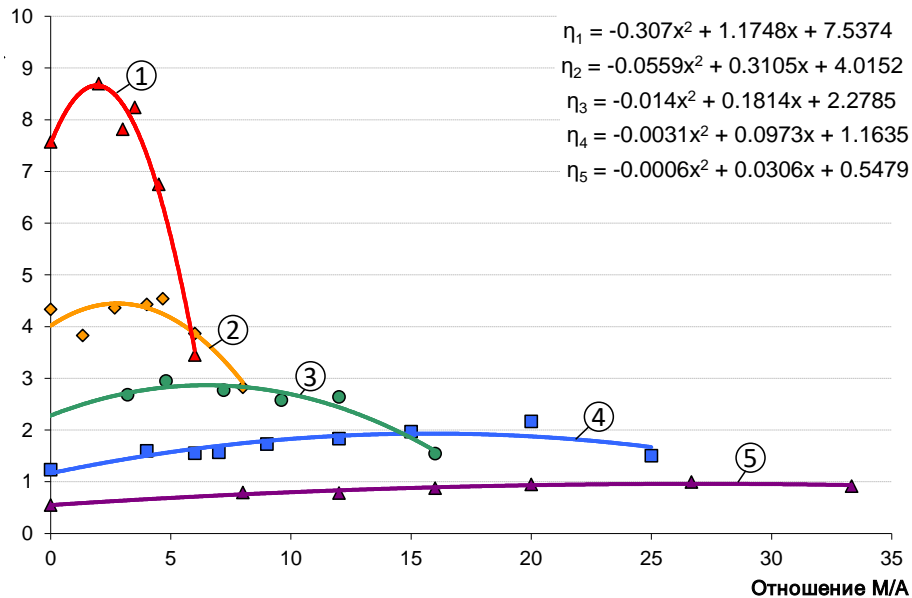


Рисунок 3.2 – Зависимость изменения вязкости эмульсий от соотношения ВА/А при содержании альгината натрия: 1 – 3,0 %; 2 – 2,3 %; 3 – 1,8 %; 4 – 1,3 %; 5 – 1,0 %

Стоит отметить, что при увеличении содержания подсолнечного масла изменение вязкости для эмульсий с различным содержанием альгината натрия имеет экстремальный характер, что свидетельствует о вкладе подсолнечного масла в формирование структуры эмульсии и в ее способность сопротивляться течению.

Концентрация подсолнечного масла, введение которой обеспечивает максимальную вязкость эмульсии, равна:

$$C_{oil} = C_{al} \frac{b}{2a}, \quad (3.12)$$

где  $C_{al}$  – концентрация альгината натрия;  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты уравнения  $\eta(r) = -ar^2 + br + c$ ;  $r$  – отношение ВА/А.

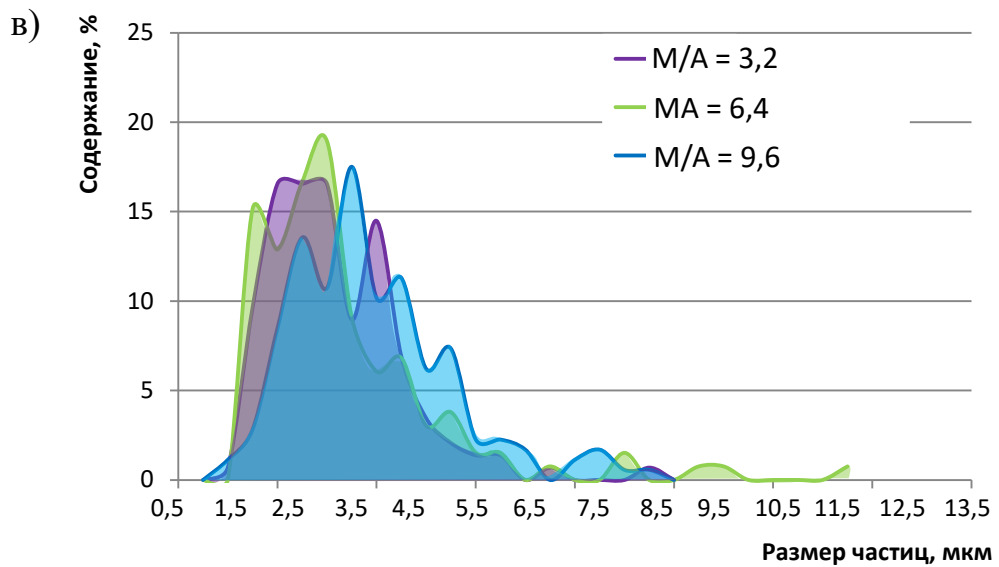
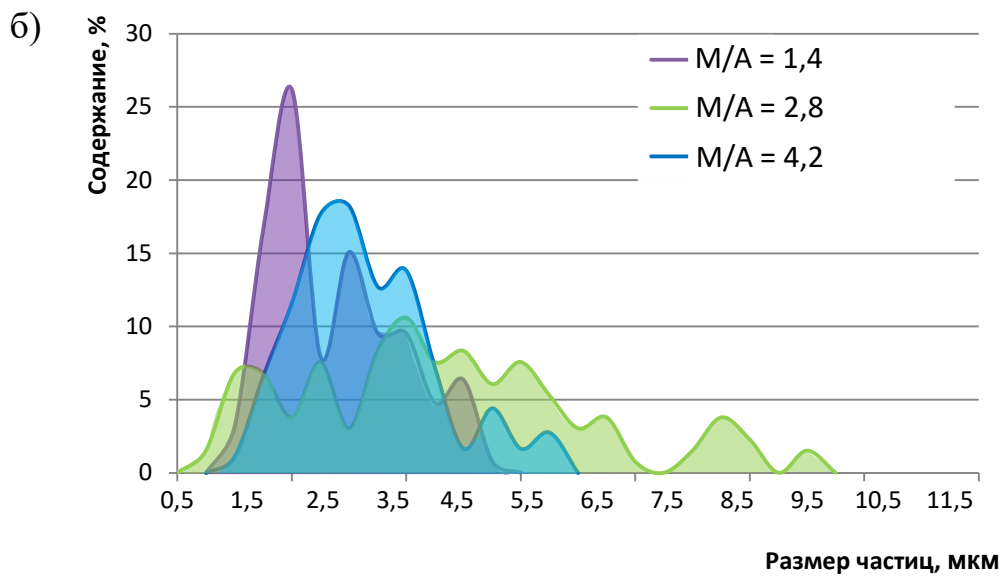
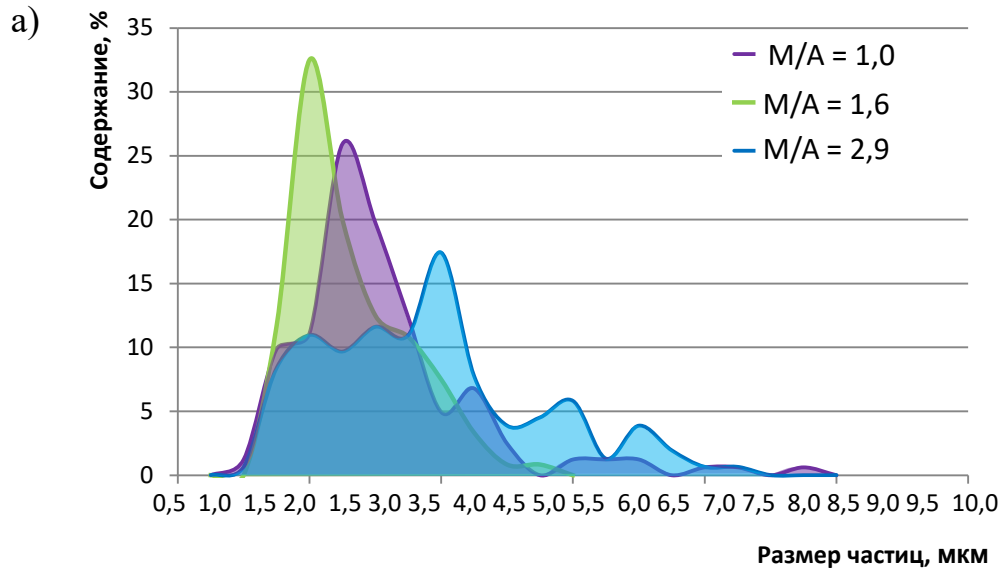
По значениям эмпирических коэффициентов  $\eta(r) = f(r)$ , представленным на рис. 3.2,

$$\frac{dC_{oil}}{dC_{al}} = \frac{40.5}{C_{al}^{2.5}}, \quad (3.13)$$

что наглядно показывает, что интенсивность структурирующего эффекта подсолнечного масла зависит от концентрации альгината натрия. Из этой зависимости следует, что уменьшение содержания альгината натрия приводит к увеличению количества подсолнечного масла, необходимого для максимального структурного эффекта. Экстремальная зависимость изменения вязкости свидетельствует о структурных отличиях эмульсий с различным содержанием компонентов, которые оказывают влияние на один из основных параметров характеризующим технологичность и эффективность процесса получения капсул с модификатором, способность сопротивляться течению. Установление влияния рецептурных параметров на структурные особенности эмульсий позволит при капсулировании различных модификаторов производить капсулы с максимальным содержанием восстанавливающего агента и оптимальными технологическими свойствами.

Реологические свойства эмульсии зависят от структуры и соотношении сил, действующих на агрегаты частиц дисперсной фазы: поверхностные силы, которые приводят к образованию контактов между частицами и формированию пространственной сетки из агрегатов и гидродинамические силы, которые приводят к разрушению агрегатов.

Гранулометрический состав эмульсий с различным содержанием альгината и подсолнечного масла представлены на рисунке 3.3.





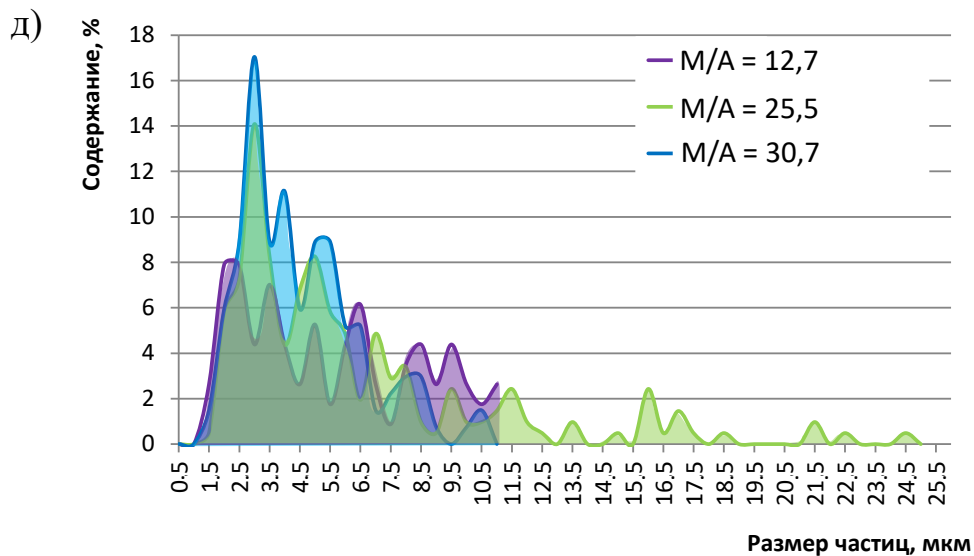
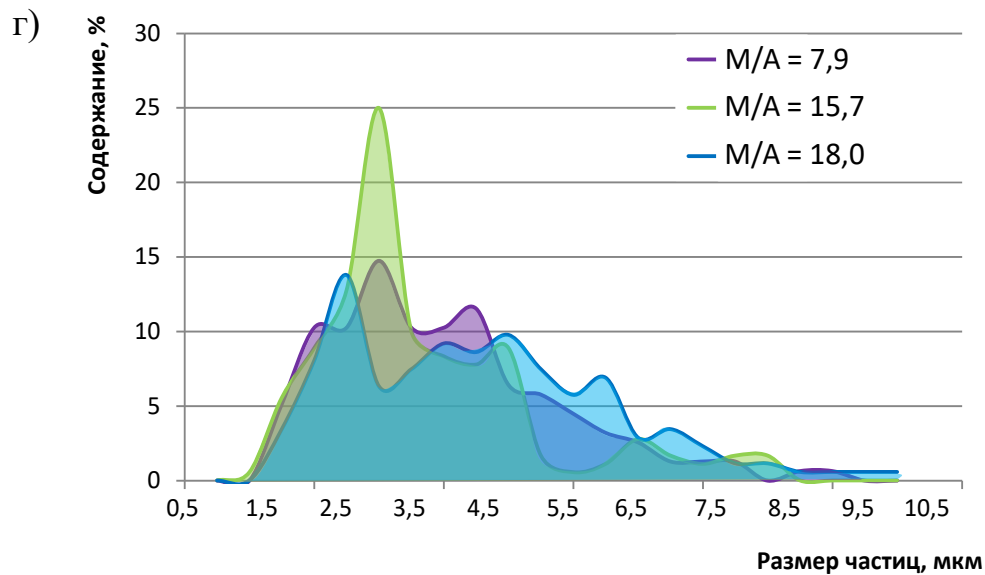


Рисунок 3.3 – Гранулометрический состав дисперсной фазы в эмульсии при содержании альгината натрия: а) 3,0 %; б) 2,3 %; в) 1,8 %; г) 1,3 5; д) 1,0 %

Анализ распределения частиц эмульсий по размерам показывает, что с увеличением соотношения ВА/А и при снижении общего содержания альгината натрия в среде средний диаметр частиц увеличивается, что свидетельствует об очевидном его структурирующем эффекте на дисперсионную среду. Структурирующий эффект, который оказывает подсолнечное масло при определенных концентрациях, будет определяться особенностями структуры эмульсии и взаимодействием между собой отдельных частиц. Количество

контактов дисперсной фазы в системе с учетом полученного распределения частиц по размерам будет определяться:

$$\chi = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{d_i^2}, \quad (3.14)$$

где  $d_i$  – диаметр  $i$ -ой фракции, м;  $C_i$  – содержание  $i$ -ой фракции;  $n$  – количество фракций.

Результаты расчета количества контактов частиц дисперсной фазы в альгинатных эмульсиях представлены на рисунке 3.4.

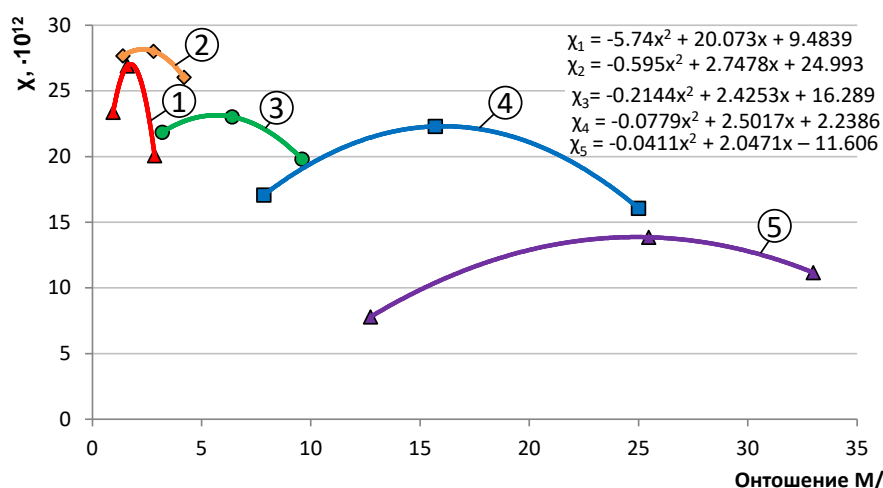


Рисунок 3.4 – Зависимость изменения количества контактов частиц эмульсии от соотношения ВА/А при содержании альгината натрия: 1 – 3,0 %; 2 – 2,3 %; 3 – 1,8 %; 4 – 1,3 %; 5 – 1,0 %

Анализ зависимостей изменения вязкости и количества контактов показывает, что расположение максимумов для двух исследуемых параметров находится в точках со схожим соотношением ВА/А.

Общей моделью взаимозависимости структурных параметров и механических свойств является модель однородного твердого тела (тела с равномерно распределенными связями; для эмульсии на первом этапе анализа эта модель применима), предложенная П.А. Ребиндера [170, 171]. Для

рассматриваемого случая (эмульсия) модель Ребиндера можно представить в виде:

$$\eta = k \cdot f_c \cdot \chi^n, \quad (3.15)$$

где  $f_c$  — контактная прочность;  $k$ ,  $n$  — константы (в классической формуле Ребиндера  $n = 2/3$ ).

Представленная модель демонстрирует, что ключевым фактором, влияющим на реологические свойства эмульсии (вязкость, предел текучести эмульсии – рисунок 3.5) является число контактов, которое в соответствии с (3.14), нелинейно зависит от диаметра частиц (гранулометрического состава дисперсной фазы эмульсии). Параметры уравнения (3.15) для различных значений прочности контакта при  $k = 1$  представлены в табл. 3.4. Из [172] известно, что для коагуляционных контактов  $f_c \leq 10^{-8}$  Н.

Таблица 3.3 – Параметры уравнения (3.15)

№ п/п	Содержание альгината натрия, %	Значение показателя $n$ при $f_c$ (Н)	
		$10^{-8}$	$10^{-12}$
1	3,0	0,67	0,96
2	2,3	0,64	0,94
3	1,8	0,63	0,93
4	1,3	0,62	0,92
5	1,0	0,61	0,91

Анализ представленных данных указывает на закономерное влияние содержания альгината натрия: с увеличением его количества наблюдается возрастание значения показателя  $n$ . Необходимо отметить, что только при содержании  $C_{al} = 3\%$  показатель степени равен классическому значению  $n = 2/3$ . Близкое значение показателя  $n$  к величине  $2/3$  указывает на однородность распределения контактов в объеме эмульсии, что позволяет сделать вывод заключение о высокой однородности распределения дисперсной фазы.

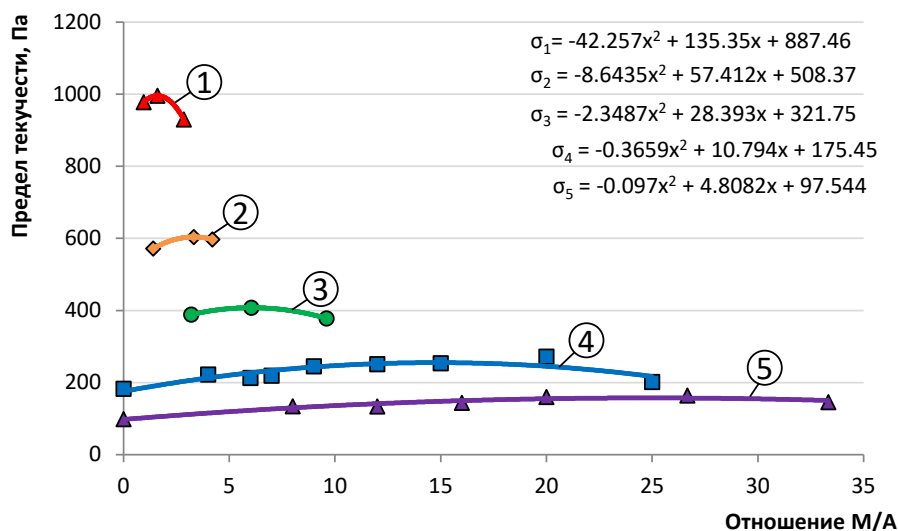


Рисунок 3.5 – Зависимость изменения предела текучести от соотношения ВА/А при содержании альгината натрия: 1 – 3,0 %; 2 – 2,3 %; 3 – 1,8 %; 4 – 1,3 %; 5 – 1,0 %

Выбор математических моделей зависимости изменения свойств эмульсий осуществлялся по коэффициенту детерминации, который представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.4 – Коэффициенты детерминации

Показатели	Коэффициенты детерминации $R^2$ для ВА/А				
	3,0	2,3	1,8	1,3	1,0
Вязкость	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93
Предельное напряжение сдвига	1,00	1,00	1,00	0,97	0,94
Количество контактов	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99
Изменения ВА/А	0,99				
Время начала деструкции	0,99				

Значения, признанные ошибкой измерения, в расчете не использовались, и испытания повторялись.

Анализ зависимостей изменения вязкости (рисунок 3.2), предела текучести эмульсий (рисунок 3.5) и количества контактов дисперсной фазы (рисунок 3.4) показывает, что наблюдаемые экстремумы для исследуемых систем с различным содержанием альгината натрия наблюдаются при схожих значениях соотношения ВА/А, которое свидетельствует о получении систем с максимальной степенью структурируемости. Это позволяет установить рецептурную границу (рисунок 3.6), в приближении которой соотношение компонентов обеспечивает получение структурированных систем и которая может быть использована при проектировании составов для капсулирования различных типов восстанавливающих агентов.

ВА/А

$$C_m = \frac{26.734}{C_{al}^{1.543}}$$

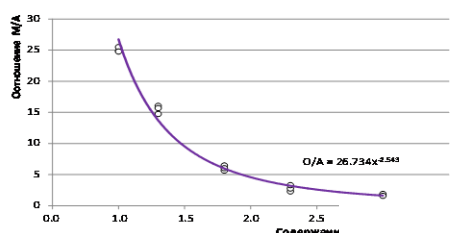


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения соотношения ВА/А от содержания альгината натрия для эмульсий с максимальной вязкостью, пределом текучести и количеством контактов

Процесс капсулирования, где используются приспособления для деления альгинатной эмульсии на отдельные частицы, является процедурой с фиксированной продолжительностью, которая зависит как от характеристик делительных воронок, так и свойств эмульсий. Водные альгинатные растворы и эмульсии, полученные на их основе, являются нестабильными во времени, так

как в естественных условиях происходит испарение воды (рисунок 3.7), что способствует изменению свойств всей дисперсной системы.

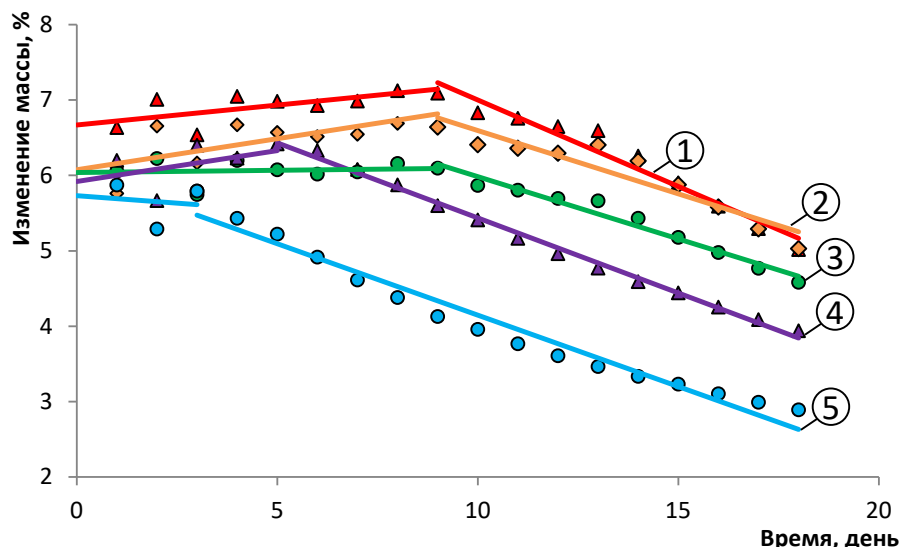
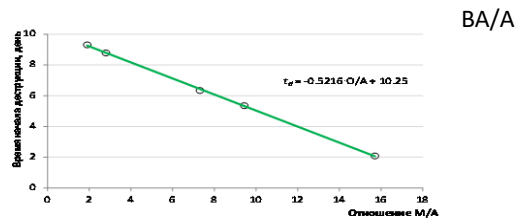


Рисунок 3.7 – Зависимость изменения массы образцов эмульсий с содержанием альгината натрия: 1 – 3,0 % (ВА/А=1,9); 2 – 2,3 % (ВА/А=2,8); 3 – 1,8 % (ВА/А=6,4); 4 – 1,5 % (ВА/А=9,4); 5 – 1,3 % (ВА/А=15,7)

На зависимостях изменения массы образцов эмульсий в течение времени можно выделить две основные стадии, где на начальной стадии наблюдается постоянное изменение массы, что обуславливается сохранностью дисперсной структуры системы. Начало следующей стадии совпадает с моментом начала сегрегации и разрушения эмульсии, в результате чего происходит образование масляной пленки на поверхности, которая препятствует дальнейшему испарению влаги с той же интенсивностью. При этом замедления испарения воды из системы на второй стадии более выражено в эмульсиях с меньшим содержанием альгината натрия и большим соотношением ВА/А, что свидетельствует о более интенсивной деструкции. Начало стадии сегрегации в таких эмульсиях начинается на более ранних этапах (рисунок 3.8).



BA/A

Рисунок 3.8 – Зависимость времени начала деструкции эмульсии от соотношения ВА/А

Очевидно, что изменение компонентного состава оказывает влияние, как на структуру эмульсий, так и на их свойства (рисунок 3.9).

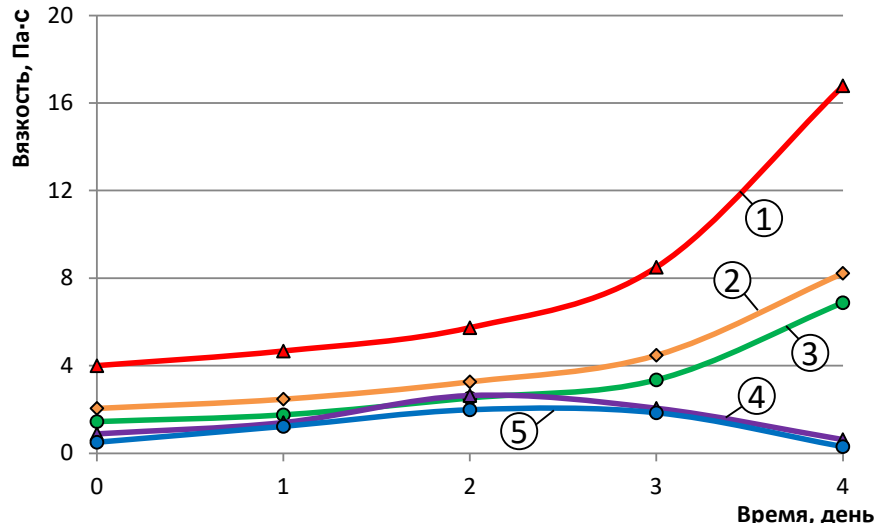


Рисунок 3.9 – Зависимость изменения вязкости образцов эмульсий с содержанием альгината натрия: 1 – 3,0 % (ВА/А=1,9); 2 – 2,3 % (ВА/А=2,8); 3 – 1,8 % (ВА/А=6,4); 4 – 1,3 % (ВА/А=15,7); 5 – 1,0 % (ВА/А=19,1)

Кинетика изменения вязкости исследуемых альгинатных эмульсий подтверждает сроки начала сегрегации в системах с содержанием альгината натрия менее 1,3 % при соотношении М/А более 15, которое наступает через

двое суток после приготовления. Составы 4 и 5 имеют максимальную вязкость на вторые сутки, после чего расслоение системы приводит к разрушению альгинатных эмульсий, потере структурной прочности и закономерному снижению вязкости, что согласуется с ранее полученными результатами определения потери массы. Для составов 1...3 (рисунок 3.9) в исследуемый период наблюдается увеличение вязкости более чем в 4 раза, при этом не отмечается признаков сегрегации суспензий, которая начинается не ранее 7 суток в соответствии с рисунком 3.7.

Наблюдаемые изменения свойств альгинатных эмульсий обуславливаются изменением структуры системы, которое происходит вследствие изменения компонентного состава – испарения воды. Результаты исследования изменения структурных параметров альгинатных эмульсий во времени представлены в таблице 3.5.



Таблица 3.5 – Кинетика изменения структурных параметров альгинатных эмульсий

№ п/п	Наименование параметра	ВА/А	Содержание альгината натрия, %	Значение параметра через сутки, $\mu\text{m}$					
				0	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Максимальный диаметр	1,9	3,0	18,21	18,54	18,87	19,20	19,53	19,86
2		2,8	2,3	19,26	19,50	19,74	19,98	20,22	20,46
3		6,4	1,8	29,50	28,70	27,90	27,10	26,30	25,50
4		15,7	1,3	18,97	28,14	37,31	46,48	55,65	64,82
5		27,2	1,0	22,78	25,21	27,64	30,07	32,50	34,93
6	Минимальный диаметр	1,9	3,0	1,90	1,96	2,02	2,09	2,15	2,21
7		2,8	2,3	1,10	1,39	1,68	1,97	2,26	2,56
8		6,4	1,8	2,47	2,10	1,73	1,37	1,00	0,63
9		15,7	1,3	1,99	2,23	2,47	2,71	2,95	3,19
10		27,2	1,0	2,40	2,20	2,00	1,81	1,61	1,41
11	Средний диаметр	1,9	3,0	5,44	5,66	5,89	6,12	6,34	6,57
12		2,8	2,3	5,64	5,85	6,06	6,27	6,48	6,69
13		6,4	1,8	6,68	7,05	7,41	7,77	8,13	8,49
14		15,7	1,3	7,03	7,99	8,96	9,92	10,89	11,86
15		27,2	1,0	8,95	9,04	9,12	9,21	9,30	9,38
16	Расстояние	1,9	3,0	8,65	6,93	5,22	3,51	1,79	0,08
17	между	2,8	2,3	8,96	6,82	4,68	2,54	0,41	–
18	частицами	6,4	1,8	7,62	5,96	4,29	2,62	0,96	–
19	дисперсной	15,7	1,3	2,85	2,33	1,81	1,29	0,76	0,24
20	фазы	27,2	1,0	2,12	1,63	1,14	0,64	0,15	–

Анализ изменения структурных параметров альгинатных эмульсий показывает, что в процессе испарения воды из системы происходит изменение

гранулометрического состава, расширяются границы максимальных и минимальных размеров частиц дисперсной фазы, увеличивается их средний диаметр. При этом в течение 5 дней среднее увеличение диаметра частиц происходит на 28 %. Изменение гранулометрического состава дисперсной фазы эмульсии обуславливается уменьшением объема дисперсионной среды, вследствие испарения воды, последующим сближением частиц между собой, их столкновением, сжатием и объединением (рисунок 3.10).

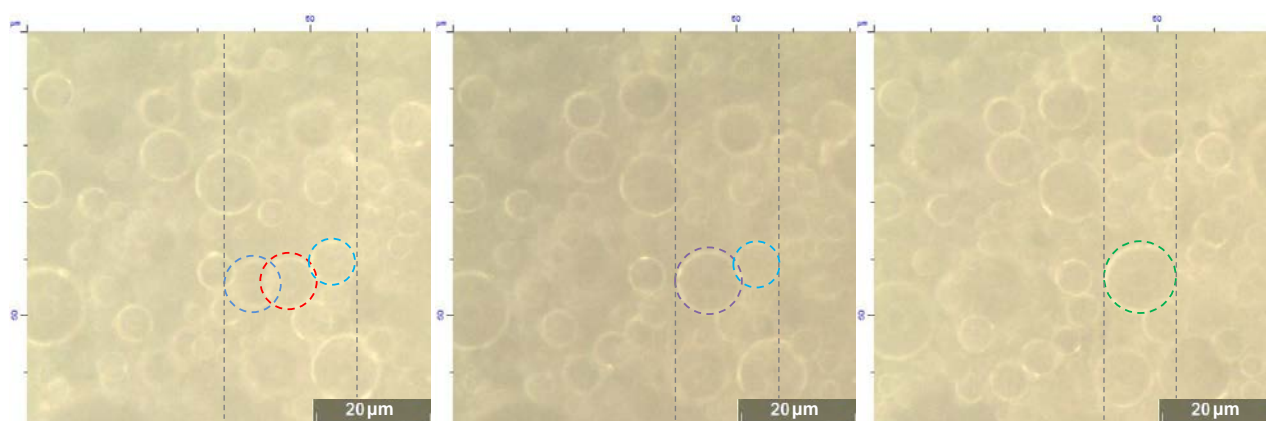


Рисунок 3.10 – Микрофотография процесса объединения частиц эмульсии (слева направо)

При этом для рассматриваемых эмульсий контактирование между собой большей части дисперсной фазы происходит через 4...5 дней, что для стабильных суспензий (содержание альгината натрия 1,8...3,0 %) сопровождается резким увеличением вязкости системы. Похожий механизм, в соответствии с которым происходит последовательное увеличение размеров частиц эмульсии, наблюдается в процессе капсулирования, когда отдельные капли эмульсии в процессе сушки преобразуются в капсулы с альгинатной оболочкой [119, 120]. Компонентом, препятствующим преждевременному разрушению эмульсий в такой технологии, является кальций, через водный раствор которого происходит формирование отдельных капель из эмульсий [121].

### 3.3 Свойства капсулированного модификатора

Технология самовосстановления асфальтобетонов предполагает использование капсулированного модификатора, который добавляется в виде капсул в смесь на стадии приготовления.

Эффективность применяемых технологии самовосстановления определяется, как способностью восстанавливающего агента ликвидировать последствия образования дефектов в композите [134], так и комплексом физико-механических свойств капсул и технологических свойств эмульсии для их производства (рисунок 3.11).

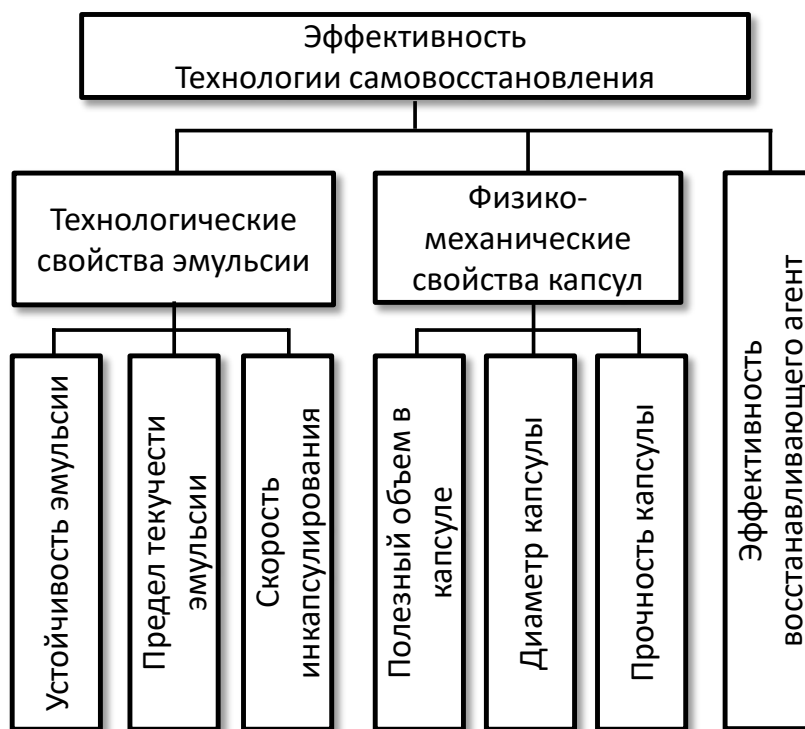


Рисунок 3.11 – Критерии эффективности капсулированного восстановителя

Очевидно, что основным критерием эффективности технологии самовосстановления является эффективность применяемого восстанавливающего агента и его воздействие на дефекты в структуре материала.

Подсолнечное масло, применяемое в качестве восстанавливающего агента, после разрушения капсулы смачивает трещины поверхности дефекта (трещины), диффундирует внутрь матрицы, оказывая омолаживающий эффект за

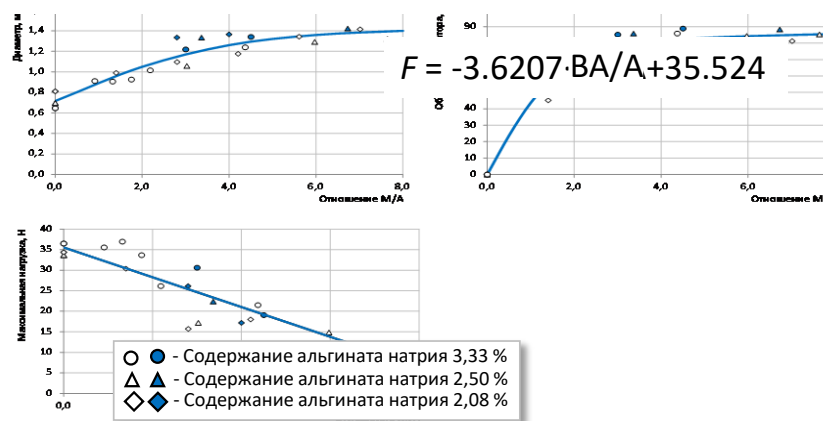
счет восстановления состава легких фракций вяжущего [121, 125]. Механизм действия такого восстанавливающего агента заключается в увеличении собственного потенциала вяжущего к восстановлению [130] и уменьшении скорости дальнейшего образования дефектов за счет снижения хрупкости.

Использование полимера, как восстанавливающего агента, позволит после смачивания поверхностей трещины и запуска процесса полимеризации за счет присутствующих в матрице активатора, сформировать прослойку, склеивающую дефект.

Эффективность технологии капсуляции, применяемых восстанавливающих агентов, определяется относительным объемом, который они занимают в капсуле. Очевидно, что капсул с большим содержанием восстанавливающего агента, окажут более существенное влияние на восстановление.

С учетом этого преимуществом обладают капсулы с меньшим диаметром, так как использование крупных капсул затрудняет равномерное их распределение в объеме материала.

Ключевым физико-механическим свойством является прочность капсул, обуславливающая реализацию технологии самовосстановления, при которой сохраняется целостность в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси и обеспечивается их разрушение в процессе образования дефектов в асфальтобетоне. Максимальная нагрузка, которую способна выдержать капсула до момента разрушения при сжатии, является показателем, отражающим способность сопротивляться механическим воздействиям. Результаты определения разрушающей нагрузки при сжатии капсул представлены на рисунке 3.12.



BA/A

Рисунок 3.12 – Зависимость разрушающей нагрузки при сжатии капсул от соотношения восстанавливающего агента и альгината натрия (BA/A): белые точки – капсулы с AR-полимером; синие точки – капсулы с подсолнечным маслом

Анализ рисунка 3.12 показывает, что увеличение содержания восстанавливающего агента в составе альгинатной эмульсии приводит к закономерному снижению разрушающей нагрузки при сжатии, что объясняется изменением геометрических параметров капсул (рисунок 3.13).

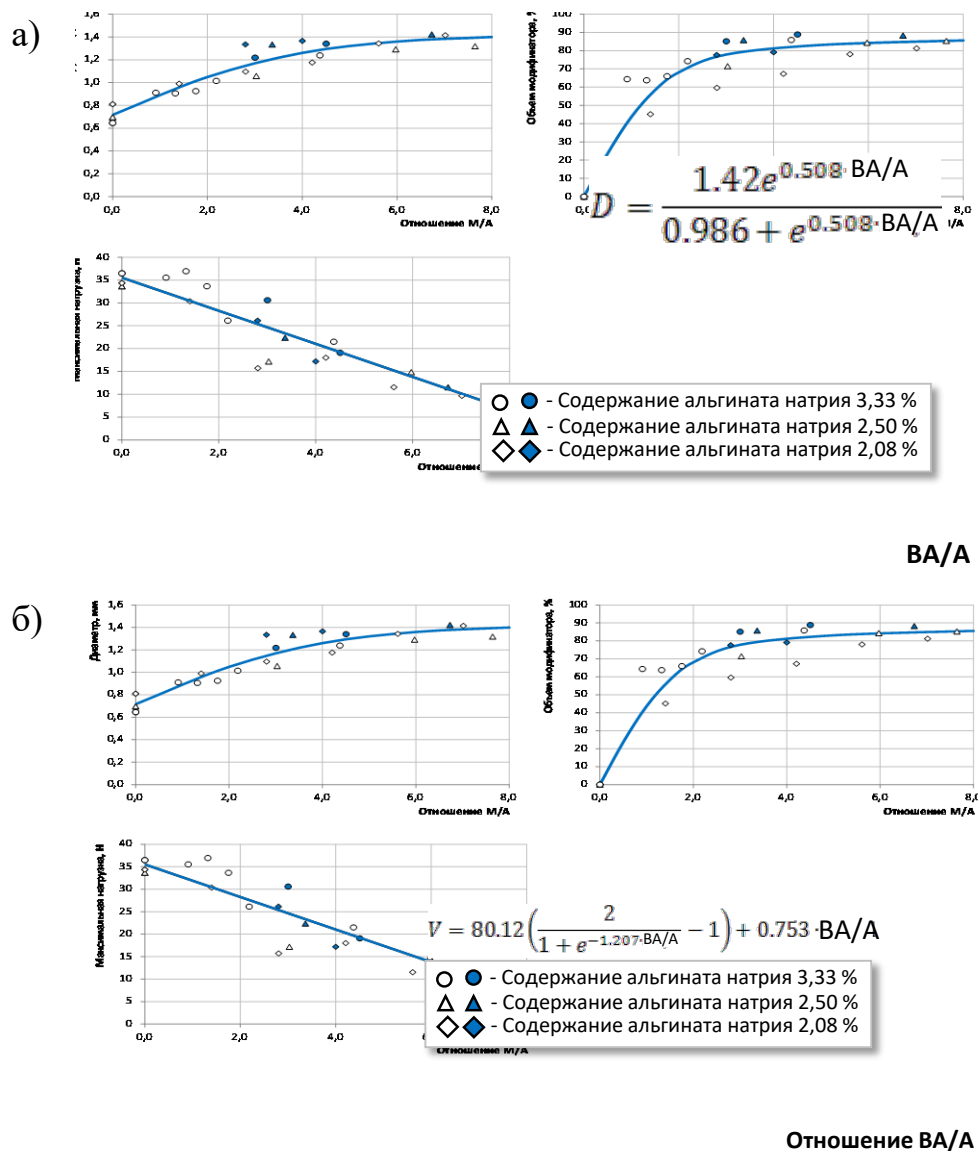


Рисунок 3.13 – Зависимость изменения геометрических параметров капсул от соотношения восстанавливающего агента и альгината натрия (ВА/А): а) диаметр капсул; б) объем восстанавливающего агента в капсуле; белые точки – капсулы с АР-полимером; синие точки – капсулы с подсолнечным маслом

При этом изменение содержания альгината натрия в исследуемом диапазоне существенного влияния на изменение механических свойств не оказывает. Уменьшение содержания альгината натрия с 3,33 до 2,08 % приводит к снижению прочности на 2...6 % при различных соотношениях ВА/А. Стоит отметить, что вид и свойства восстанавливающего агента не оказывает влияния на изменение механических свойств капсул. Изменение разрушающей нагрузки при

сжатию капсул от соотношения восстанавливающего агента и альгината натрия описывается общей линейной зависимостью  $F = -3.6207 \cdot \text{BA/A} + 35.524$ .

Изменение диаметра капсулы и объема восстанавливающего агента в капсуле с увеличением содержания восстанавливающего агента в альгинатной эмульсии подчиняется экспоненциальной зависимости. Размер капсулы увеличивается за счет увеличения в ее объеме восстанавливающего агента, который она может вместить. При этом на рисунке 3.13б видно, что объем восстановителя в капсуле ограничивается максимальным допустимым значением, которое может обеспечить альгинатная технология. На графике видно плато на значении 83 %, после достижения которого, увеличение содержания восстанавливающего агента в альгинатной эмульсии оказывает не существенное влияние. Таким образом, оптимальными вариантами являются составы альгинатной эмульсии, обеспечивающие получение капсул с максимальным содержанием восстанавливающего агента. Учитывая зависимость изменения объема восстановителя в капсуле:

$$V = 80,12 \left( \frac{2}{1 + e^{-1,207 \cdot \text{BA/A}}} - 1 \right) + 0,753 \cdot \text{BA/A} \quad (3.16)$$

значение соотношения BA/A, обеспечивающее получение капсул с объемом восстанавливающего агента не менее  $83 \pm 1$  %, должно быть более  $4,8 \pm 0,2$ .

Эффективность капсул с одинаковым объемом восстанавливающего агента и показателями прочностных характеристик определяется их диаметром. Поскольку более равномерное распределение необходимого объема восстанавливающего агента в объеме композита достигается при использовании капсул с меньшим диаметром. Таким образом, с учетом зависимости изменения диаметра капсул:

$$D = \frac{1,42e^{0,508 \cdot \text{BA/A}}}{0,986 + e^{0,508 \cdot \text{BA/A}}} \quad (3.17)$$

размер капсул, обеспечивающих наибольшую эффективность технологии самовосстановления, должен соответствовать значению  $1,35 \pm 0,02$  мм.

Исходя из схожей динамики изменения физико-механических свойств капсул, оптимизацию составов альгинатных эмульсий целесообразно проводить по показателям их технологических свойств.

Реализации технологии включает подбор оптимального соотношения компонентов эмульсии для капсуляции с необходимой текучестью и стойкостью к расслоению, которые обеспечат максимальную скорость процесса производства капсул.

Установлено [55, 173], что восстанавливающий агент в составе альгинатных эмульсий оказывает структурирующий эффект и вдоль определенной рецептурной границы достигается получение эмульсий с максимальным сопротивлением течению при различных концентрациях альгината натрия (рисунок 3.14а).



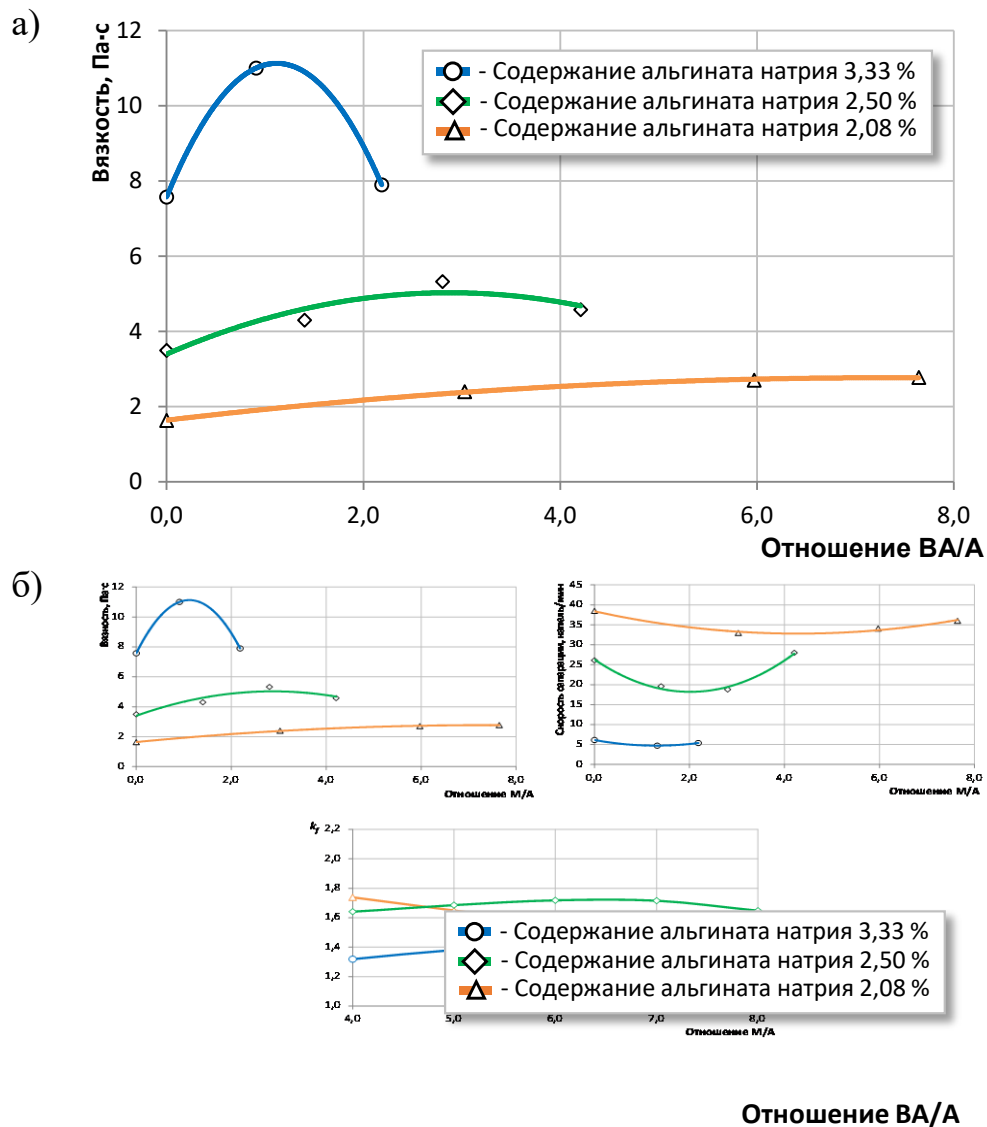


Рисунок 3.14 – Зависимость изменения вязкости (а) и скорости сепарации (б) эмульсии на отдельные частицы (капли) альгинатной эмульсии с AR-полимером от соотношения восстанавливающего агента и альгината натрия

Для альгинатных эмульсий с AR-полимером также наблюдается указанный эффект максимального структурирования обуславливает максимальное сопротивление течению, которое влияет на скорость сепарации эмульсии на отдельные гранулы (капли) (рисунок 3.14б). При этом зависимости изменения скорости сепарации эмульсии от рецептурных факторов описываются квадратичными зависимостями с коэффициентами регрессии, отраженными в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Коэффициенты уравнений зависимости изменения скорости сепарации эмульсий

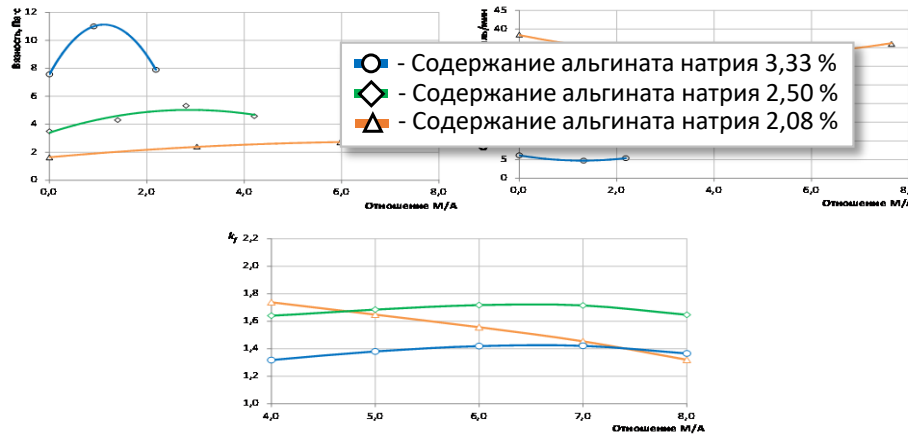
Содержание альгината натрия, %	Значение коэффициентов		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
3,33	0,3045	-2,6123	38,392
2,50	1,9947	-8,0441	26,314
2,08	0,8389	-2,1794	6,140

Таким образом, оптимальный состав альгинатной эмульсии определяется критерием эффективности, учитывающим как механические требования к получаемым капсулам, так и технологичность самих эмульсий, который можно представить в виде функции:

$$k_f = \sqrt[4]{k_F k_D k_V k_R}, \quad (3.18)$$

где  $k_R = R_{RA}/R_0$  – скорость сепарации альгинатной эмульсии;  $R_{RA}$  – скорость сепарации альгинатной эмульсии, содержащих AR-полимер, кап/мин;  $R_0$  – скорость сепарации альгинатной эмульсии без восстанавливающего агента;  $k_F = F_{RA}/F_0$  – критерий прочности капсул;  $F_{RA}$  – максимальная нагрузка для капсул, содержащих AR-полимер, Н;  $F_0$  – максимальная нагрузка для частиц без восстанавливающего агента, Н;  $k_D = D_{RA}/D_0$  – геометрический критерий капсул;  $D_{RA}$  – диаметр капсул, содержащих AR-полимер, мм;  $D_0$  – диаметр частиц без восстанавливающего агента, мм;  $k_V = V_{RA}/V_{\max}$  – объемный критерий капсул;  $V_{RA}$  – объем восстанавливающего агента в капсуле, %;  $V_{\max}$  – максимальный объем восстанавливающего агента в капсуле, принятый 99 %.

Результаты расчета критерия эффективности рассматриваемых альгинатных эмульсий представлены на рисунке 3.15.



Отношение ВА/А

Рисунок 3.15 – Зависимость критерия эффективности капсул от соотношения восстанавливающего агента и альгината натрия

Результаты расчета показывают, что наибольшая эффективность капсул при максимальном содержании AR-полимера в качестве восстанавливающего агента (более 83 %) и большей прочностью достигается для эмульсий, содержащих 2,50 % альгината натрия при  $BA/A=5,0\pm 0,2$ .

Таким образом, доказано, что получение капсул с содержанием восстанавливающего агента не менее 83 % при использовании в качестве восстановителя AR-полимера достигается с помощью альгинатных эмульсий, оптимизация которых осуществляется за счет регулирования рецептурно-технологических параметров.

В процессе производства асфальтобетонной смеси и при изготовлении дорожного покрытия (уплотнение асфальтобетонной смеси) капсулы подвергаются воздействию температуры и давлению, которые могут привести к их преждевременному разрушению. Естественно, что влияние указанных факторов должно быть исследовано.

Приготовление горячих асфальтобетонных смесей в соответствии с нормативными документами и в зависимости от марки применяемого битума осуществляется при температуре от 135 до 175 °С.

Термостойкость капсулированного модификатора определялась показателям изменения массы и прочности капсул после термостатирования в течение 1; 2 и 4 часов при температуре 140; 150; 160 и 170 °С.

Результаты определения разрушающей нагрузки после термостатирования представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Разрушающая нагрузка после термостатирования

Температура, °С	Значение показателя после термостатирования в течение времени*, ч			
	0	1	2	4
140	28,2	28,2	28,1	28,1
	0	0	0,4	0,4
150	28,2	28,1	27,8	27,1
	0	0,4	1,4	4,0
160	28,2	24,4	22,7	19,8
	0	13,4	19,5	29,9
170	28,2	22,0	19,2	15,0
	0	22,0	31,9	46,9

Примечание. \* – в числителе указано значение максимальной нагрузки, Н; в знаменателе – относительное изменение максимальной нагрузки, %

Данные таблицы демонстрируют наличие S-образной зависимости относительного изменения максимального разрушающего усилия от температуры изотермической выдержки капсул (рисунок 3.16). При этом наблюдается тождественный характер изменения такой зависимости с увеличением продолжительности изотермической выдержки. Однако выход на асимптоту четко выражен для низкотемпературных режимов термостатирования.

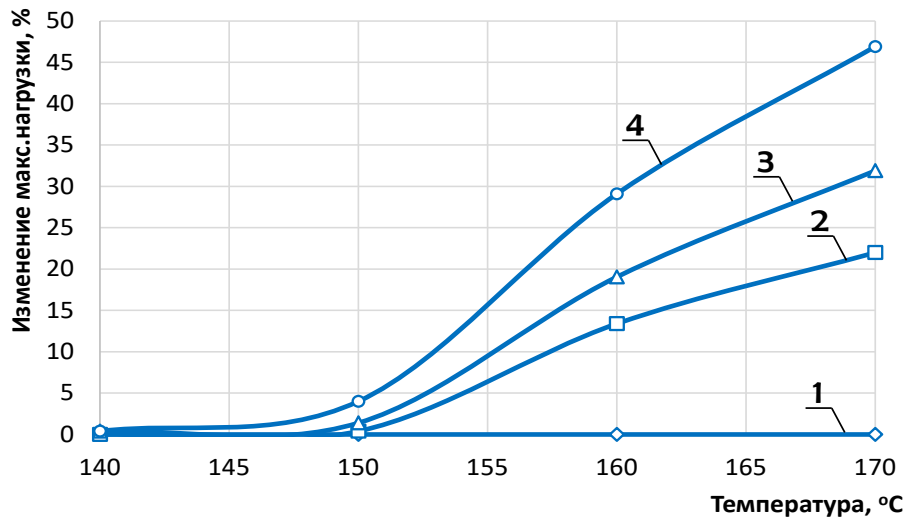


Рисунок 3.16 – Зависимость относительного изменения разрушающего усилия от температуры изотермической выдержки капсул:

1 – 0 ч; 2 – 1 ч; 3 – 2 ч; 4 – 4 ч

Наиболее значительное снижение разрушающего усилия наблюдается при температуре 170 °С. При этом наблюдается хорошая корреляция данных по относительному изменению максимального разрушающего усилия и потере массы капсул (рисунок 3.16): коэффициент линейной корреляции равен  $r = 0,83$ .

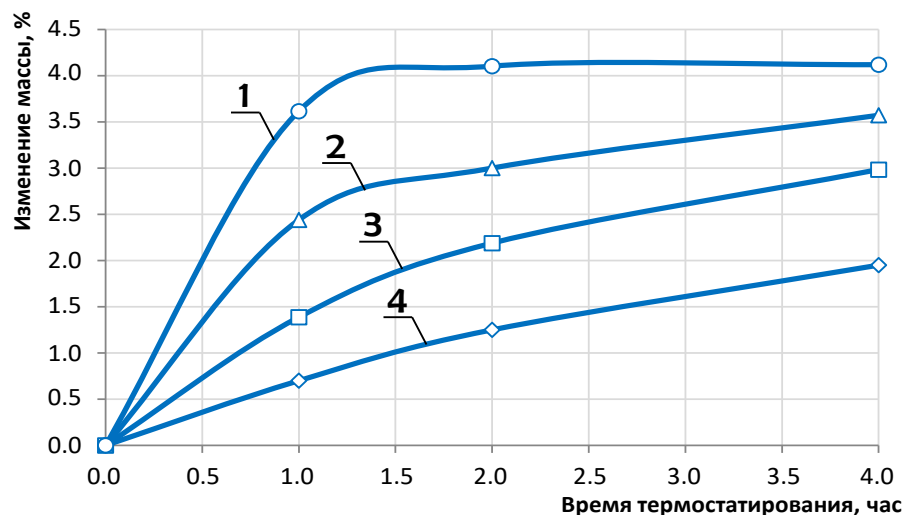


Рисунок 3.17 – Зависимость изменения массы от времени изотермической выдержки капсул: 1 – 140 °С; 2 – 150 °С; 3 – 160 °С; 4 – 170 °С

Большее изменение массы капсул происходит после изотермической выдержки при температуре 170 °С, которое составляет 4 %. При снижении температуры и продолжительности термостатирования потеря массы естественно уменьшается. Так, при термостатировании при температуре 140 °С в течение 4 часов потеря массы не превышает 2 %. Изменение массы гранул очевидно связано с испарением воды (рисунок 3.18).

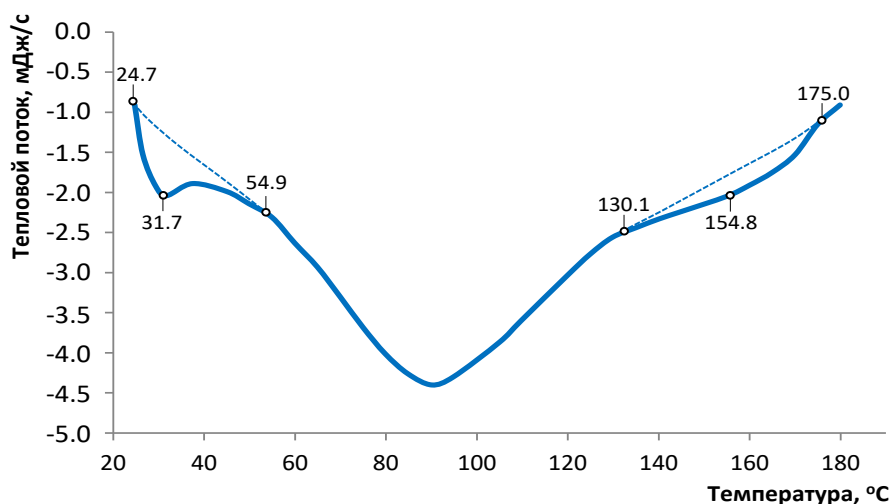


Рисунок 3.18 – Термограмма ДСК альгината кальция

На термограмме дифференциальной сканирующей калориметрии альгината кальция обнаружены две аномалии. Первая аномалия на графике в диапазоне до 55 °С характеризует процесс испарения физически адсорбированной воды. Вторая аномалия характеризует начало экзотермического процесса при температуре 130,1 °С, который заканчивается при температуре 154,8 °С. Этот процесс указывает на структурные изменения альгината кальция, которые происходят при этих температурах (рисунок 3.19).

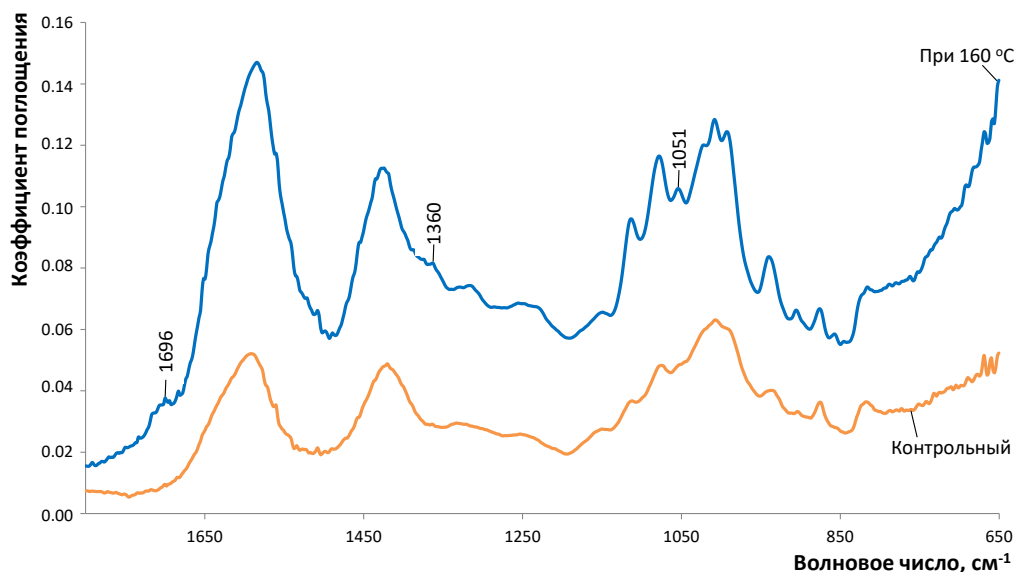


Рисунок 3.19 – ИК-спектры альгината кальция до и после воздействия температуры 160 °С

Увеличение интенсивности колебаний всех связей и появление новых пиков на ИК-спектре при волновых числах 1696; 1360 и 1051  $\text{см}^{-1}$  наблюдается после изотермической выдержки альгината кальция. Эти пики указывают на появление дополнительных колебаний в области асимметричных и симметричных валентных колебаний С-О группы  $\text{COO-}$  и валентных колебаний С-О, С-С и С-О-С связей. Эти изменения указывают на отрицательное влияние температуры выше 155 °С на структуру альгината кальция. Таким образом, меньшее негативное влияние на физико-механические свойства капсул оказывает температура, не превышающая 150 °С, что позволяет использовать капсулированный модификатор в составе асфальтобетона при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

При приготовлении асфальтобетонной смеси воздействие температур от 140 до 170 °С приводит к испарению физически адсорбированной воды из капсул альгината кальция, а также к его преобразованиям при изотермической выдержке. Температура и продолжительность изотермической выдержки приводят к снижению величины разрушающего усилия. Зависимость относительного изменения максимального разрушающего усилия от температуры изотермиче-

ской выдержки капсул имеет S-образный характер, тождественный при увеличении продолжительности термостатирования. Установлено значение коэффициента линейной корреляции между показателем относительного изменения максимального разрушающего усилия и потерей массы гранул  $r = 0,83$ , что позволяет на качественном уровне проводить прогноз прочности гранул по более легко реализуемой методике определения потери массы гранул. Таким образом, меньшее влияние на физико-механические свойства капсул оказывает температура, не превышающая  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет использовать капсулированный модификатор в составе асфальтобетона при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.



### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Установлены соотношения компонентов для получения альгинатных эмульсий, которые могут быть использованы при разработке композиций для капсулирования различных типов восстановителей. Диапазон можно рассчитать, изменяя соотношение ВА/А в зависимости от содержания альгината натрия, при котором достигается максимальная вязкость эмульсий:

$$O/A = 26.734C_{al}^{-2.543}.$$

2. Высокая устойчивость альгинатных эмульсий к расслоению соответствует структурированной системе, начало разрушения которой определяется отношением ВА/А и может быть описано зависимостью  $t_d = -0,5216 \cdot \text{ВА/А} + 10,25$ .

3. Структура устойчивых альгинатных эмульсий характеризуется средним размером частиц дисперсной фазы от 5 до 7 мкм, среднее расстояние между которыми составляет от 7 до 9 мкм.

4. Изменение гранулометрического состава дисперсной фазы происходит в процессе испарения воды из альгинатной эмульсии, что объясняется уменьшением объема дисперсионной среды, сближением частиц, их столкновением, сжатием, и объединение. Увеличение диаметра частиц происходит в среднем на 28 % за 5 сут, что сопровождается увеличением вязкости в 4 раза.

5. При приготовлении асфальтобетонной смеси воздействие температур от 140 до 170 °С приводит к испарению адсорбированной и химически связанной воды из капсул альгината кальция, содержание которых не превышает 4 %.

6. Снижение прочности капсул при растрескивании происходит при воздействии температуры. Влияние температуры 140 °С на прочность капсул незначительно, а при 150 °С прочность снижается всего на 4 %.

7. Изменения в структуре альгината кальция происходят при температуре выше 155 °С. Так, меньшее влияние на физико-механические свойства капсул оказывает температура, не превышающая 150 °С, что позволяет использовать

капсулированный модификатор в составе асфальтобетона при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

8. Разработаны составы капсулированного полимерного модификатора, обладающего следующими свойствами: средний диаметр – 1,35 мм; содержание модификатора – 83 %; прочность – 18 Н; термостойкость – до 150 °С

## ГЛАВА 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА И СВОЙСТВА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА С КАПСУЛИРОВАННЫМ ПОЛИМЕРНЫМ МОДИФИКАТОРОМ

### 4.1 Способность асфальтобетона к самовосстановлению

Асфальтобетоны эксплуатируются в среде с переменным воздействием механических и температурных нагрузок, вследствие чего в материале происходит процесс трещинообразования, который является основной причиной преждевременного выхода из строя дорожных покрытий автомобильных дорог [174]. Улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетона достигается использованием в составе асфальтобетонных смесей функциональных модификаторов. Классические добавки улучшают способность асфальтобетона сопротивляться динамическим воздействиям [175], продлевая сроки начала трещинообразования. Новый вид добавок, обеспечивающих способность асфальтобетона к самовосстановлению [175], способствует ликвидации части дефектов на этапе эксплуатации, сохраняя функциональность материала. В настоящий момент большое количество исследований [177...179] направлено на разработку новых решений, позволяющих создавать эффективные самовосстанавливающиеся асфальтобетоны. Сложность разработки таких решений в асфальтобетонах обусловлена как термопластичной природой вяжущего вещества, так и технологическими особенностями производства материала.

Формирование трещин в асфальтобетоне происходит в матрице или на границе раздела фаз «вяжущее вещество–заполнитель». Дефекты на начальном этапе образуются на микромасштабном уровне с дальнейшим объединением их в макротрещины [180]. Эффективность процесса залеживания асфальтобетона зависит как от управляемых факторов, которые регулируются за счет рецептурных параметров, так и от неуправляемых факторов, определяющихся условиями эксплуатации дорожной конструкции (рисунок 4.1).

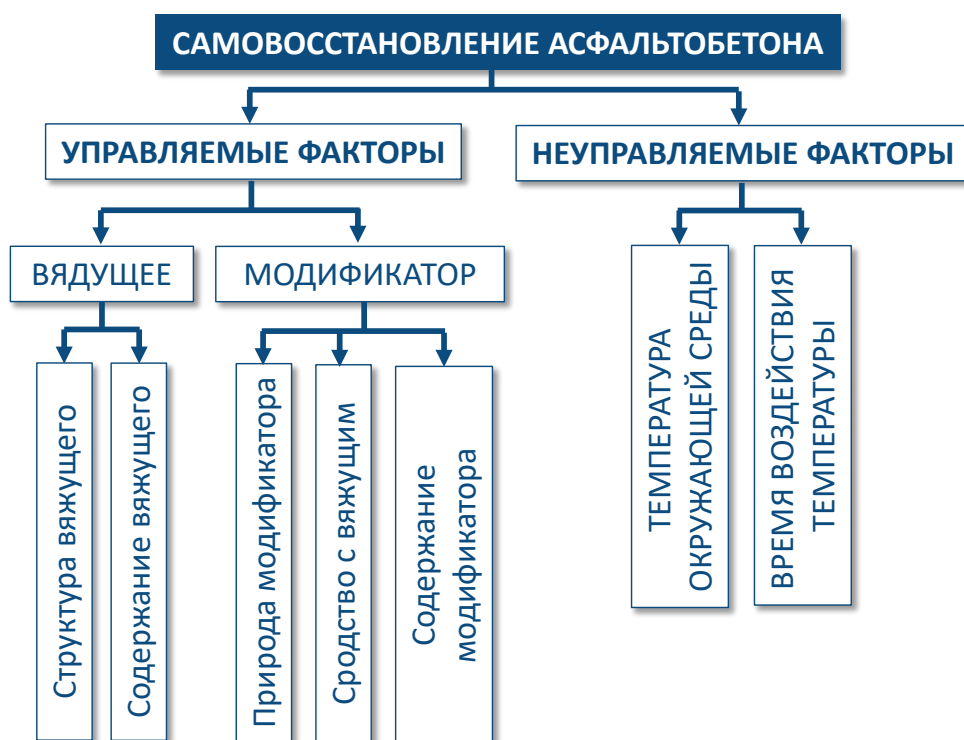


Рисунок 4.1 – Декомпозиция факторов влияющих на самовосстановление асфальтобетона

К управляемым факторам относятся рецептурно-технологические параметры производства асфальтобетона, которые управляются на этапе проектирования состава асфальтобетонной смеси. Управление самовосстанавливающей способностью асфальтобетона достигается за счет двух основных компонентов: битума и специальных модификаторов.

Способность битума самостоятельно ликвидировать дефекты в структуре обуславливается его термопластичными свойствами и обеспечивается за счет самопроизвольного спутывания молекула [181]. Эти процессы обуславливают собственный потенциал к самовосстановлению битума в асфальтобетоне, который зависит от содержания вяжущего в смеси и его группового состава.

Использование различного рода модификаторов для интенсификации процесса самозалечивания является решением в значительной степени обуславливающее его эффективность. При этом природа используемого модификатора и его степень сродства с битумом будет влиять не только на эффективность самовосстановления, но и на механизм этого процесса. Так, например, капсули-

рованный омолаживатель способен увеличить собственный потенциал самовосстановления битума за счет изменения его группового состава [182, 183]. А капсулированный полимерный модификатор выступает в качестве склеивающего агента, формируя новые структурные связи [184, 185].

Неуправляемыми факторами, которые влияют на самовосстановление асфальтобетона, является температура окружающей среды и время ее воздействия. Влияние температуры обусловлено термопластичными свойствами битума в составе асфальтобетона, когда за счет вязкоупругого течения способствует закрытию микротрещин, предотвращая их развитие. При этом интенсивность этого процесса зависит от межмолекулярного расстояния и скорости теплового движения молекул, которая закономерно увеличивается с ростом температуры. Важным условием протекания процесса самовосстановления в период эксплуатации при повышенных температурах является отсутствие значительных пластических деформаций. Так, при увеличении температуры кинетическая энергия вращательного и колебательного движения молекул вяжущего вещества возрастает, что естественно приводит к росту расстояния молекулами. Следствием этого является увеличение объема материала и снижение вязкости у термопластического материала [186, 187]. В этом случае в зоне дефекта (трещины) при достаточной близости ее поверхностей может возникнуть контакт, способствующий их самопроизвольному сращиванию.

В настоящий момент не существует единого подхода по оценке эффекта самовосстановления в материалах. В большинстве случаев используется расчет относительного изменения прочности после периода отдыха. Однако для различных схем нагружения и условий испытаний такой подход может не отражать способность материала восстанавливаться.

В данной работе для оценки эффекта собственного потенциала самовосстановления использовались подход, учитывающий остаточную прочность, относительно которой рассчитывалась собственный потенциал самозалечивания (*HP*):

$$HP = \frac{R_h - R_1}{R_0} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

где  $R_h$  – предел прочности после самовосстановления, МПа;  $R_0$  – предел прочности до самовосстановления, МПа;  $R_1$  – остаточная прочность, МПа.

Результаты определения показателей прочности асфальт при различных схемах нагружения и различных условиях восстановления в соответствии с планом эксперимента, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Показатели прочности ЩМА

№	$X_1$ , °С	$X_2$ , день	Предел прочности, МПа											
			ЩМА на БНД <sub>1</sub>						ЩМА на БНД <sub>2</sub>					
			При сжатии			При изгибе			При сжатии			При изгибе		
			$R_0$	$R_1$	$R_h$	$R_0$	$R_1$	$R_h$	$R_0$	$R_1$	$R_h$	$R_0$	$R_1$	$R_h$
1	30	4	3,36	1,32	1,64	1,95	–	0,05	3,17	1,85	1,91	1,74	–	0,34
2	60	4			2,12		–	0,41			1,97		–	0,87
3	30	10			1,82		–	0,21			1,98		–	0,37
4	60	10			2,11		–	0,65			1,88		–	0,29
5	23,8	7			1,60		–	0,01			1,90		–	0,05
6	66,2	7			2,03		–	0,32			1,94		–	1,24
7	45	2,75			1,73		–	0,06			2,02		–	0,29
8	45	11,24			1,75		–	0,31			1,92		–	0,48
9	45	7			1,81		–	0,23			1,95		–	0,54

Показатели прочности свидетельствуют о большей хрупкости асфальтобетона на битуме БНД<sub>1</sub>, что обусловлено меньшим содержанием ароматических соединений в его составе. Для образцов, испытываемых при изгибе, остаточная прочность отсутствует. При этом у асфальтобетона на БНД<sub>2</sub> остаточная прочность при сжатии составляет 58 % от предела прочности, а для асфальтобетона на БНД<sub>1</sub> – 40 % от предела прочности. Вероятно, это связано с влиянием

группового состава битума на деформативные свойства асфальтобетона. Асфальтобетон, полученный с использованием БНД<sub>1</sub>, где концентрация парафино-нафтеновых и ароматических соединений выше склонен к большим деформациям, в результате чего после теста на сжатие происходит деформирование и смещение структурных элементов, что способствует формированию менее устойчивой структуры. Эти факторы необходимо учитывать при выборе методики определения самовосстанавливающей способности.

С использованием значений показателей прочности были рассчитаны характеристики восстановления, на основе которых получены уравнения регрессии, отражающие зависимость собственного потенциала самовосстановления от температуры и времени ее воздействия в период отдыха.

Для асфальтобетона на битуме БНД<sub>1</sub> уравнения имеют вид:

$$HP_{C1} = 14,7 + 5,09 \cdot X_1 + 0,76 \cdot X_2 - 1,35 \cdot X_1X_2 + 1,17 \cdot X_1^2 + 0,09 \cdot X_2^2, (4.2)$$

$$HP_{B1} = 12,0 + 7,95 \cdot X_1 + 4,86 \cdot X_2 + 1,05 \cdot X_1X_2 + 0,12 \cdot X_1^2 + 0,79 \cdot X_2^2, (4.3)$$

а для асфальтобетона на битуме БНД<sub>2</sub> уравнения имеют вид:

$$HP_{C2} = 3,2 + 0,05 \cdot X_1 - 0,66 \cdot X_2 - 1,23 \cdot X_1X_2 - 0,55 \cdot X_1^2 - 0,23 \cdot X_2^2, (4.4)$$

$$HP_{B2} = 30,7 + 15,27 \cdot X_1 - 2,07 \cdot X_2 - 8,72 \cdot X_1X_2 + 2,39 \cdot X_1^2 - 5,06 \cdot X_2^2, (4.5)$$

где  $HP_{Ci}$  и  $HP_{Bi}$  – потенциал самовосстановления образцов при испытании на сжатие и изгиб, соответственно.

Исследуемые зависимости графически представлены на рисунке 4.2 для образцов асфальтобетона на основе БНД<sub>1</sub> и на рисунке 4.3 для образцов асфальтобетона на основе БНД<sub>2</sub>.

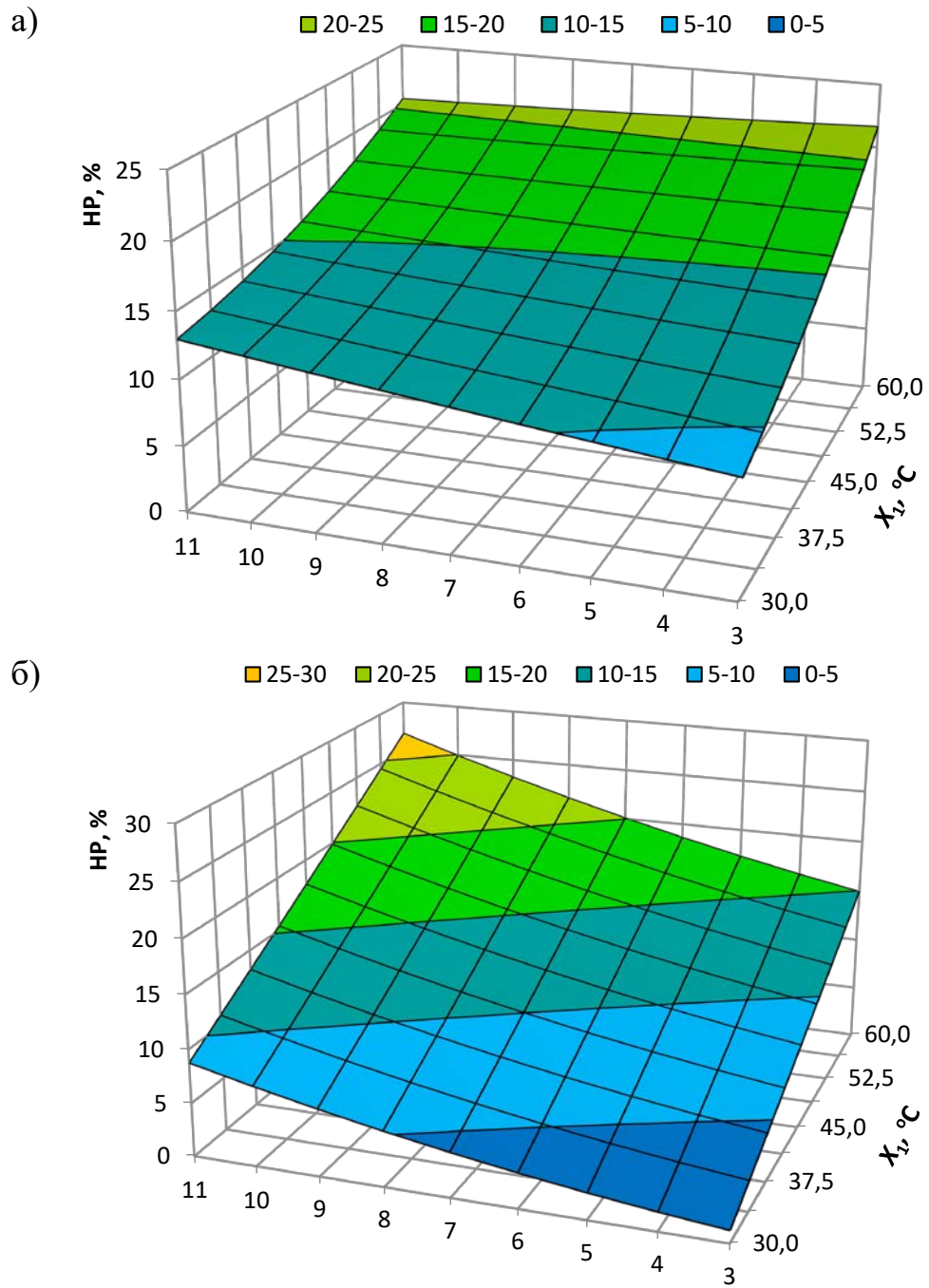


Рисунок 4.2 – Графическое изображение уравнений: а – (4.2); б – (4.3)



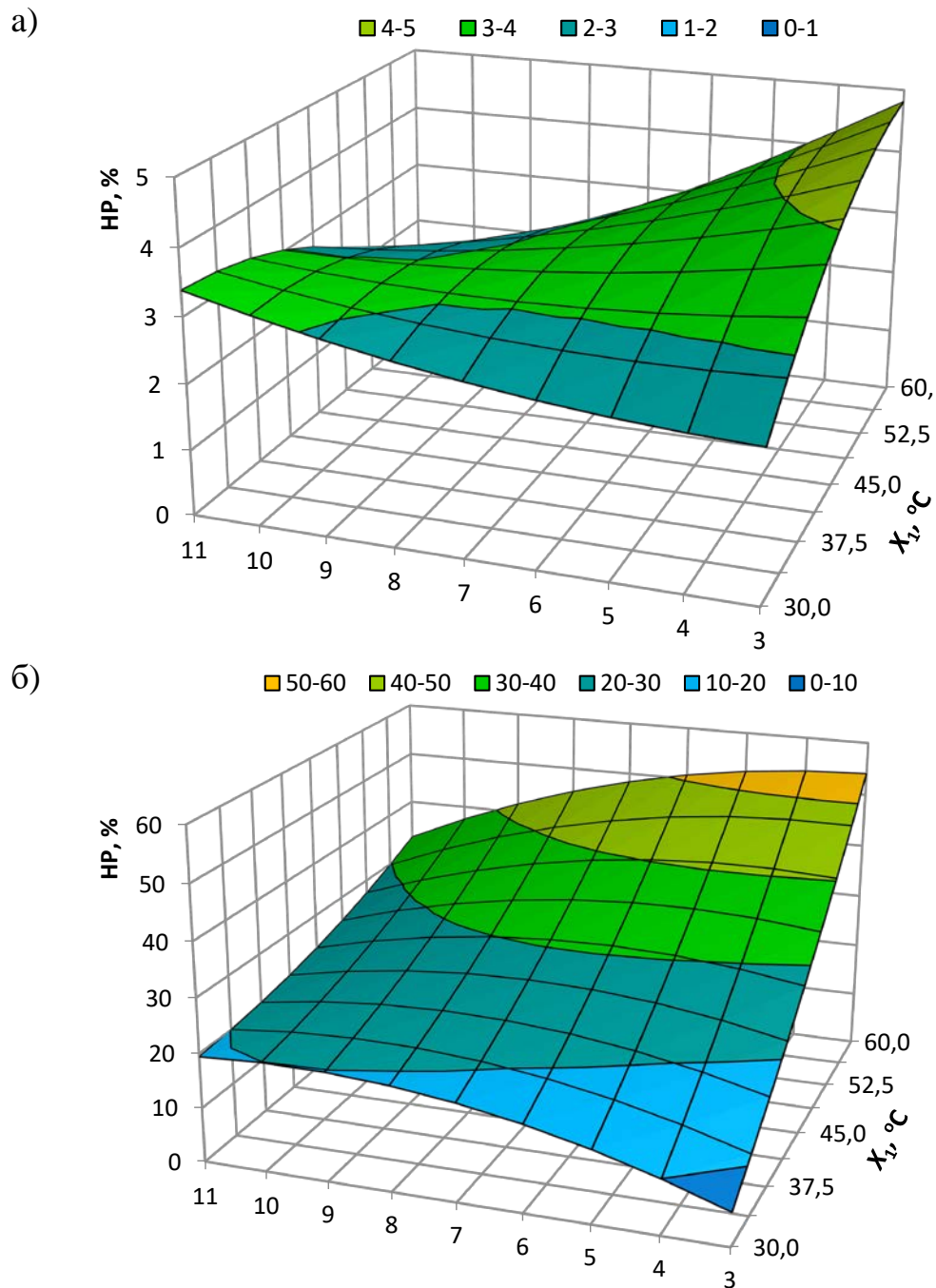


Рисунок 4.3 – Графическое изображение уравнений: а – (4.4); б – (4.5).

Анализ полученных математических моделей, описывающих зависимость изменения собственного потенциала самозалечивания от температуры и времени ее действия в период отдыха асфальтобетона от нагрузок, показывает, что исследуемые факторы оказывают различное влияние на образцы, изготовленные на основе битумов с различным групповым составом, и испытанные при различных условиях.

Температурный фактор положительно влияет на собственный потенциал восстановления асфальтобетонов: при увеличении температуры до температуры близкой к температуре размягчения битума наблюдается увеличение прочности после самозалечивания. Этот эффект обусловлен изменением реологических свойств матрицы, снижение вязкости битума и увеличением подвижности молекул. В таком состоянии возрастает вероятность самопроизвольного спутывания молекул между собой и срастания их через восстановление специфические связей [108, 109]. При этом интенсивность этого процесса зависит от межмолекулярного расстояния и скорости теплового движения молекул, которая закономерно увеличивается с ростом температуры. В этом случае в зоне дефекта (трещины) при достаточной близости ее поверхностей может возникнуть контакт, способствующий их самопроизвольному сращиванию. Теоретическим обоснование реализации механизма самовосстановления в таком случае является рассмотрение дефекта с привлечением давления Лапласа. Представляя дефект как две поверхности, между которыми находится газовая фаза. На каждой поверхности возникает давление Лапласа, которое направлено во внутренний объем каждой фазы, формирующей поверхность дефекта. Это давление препятствует самопроизвольному самовосстановлению.

Стоит отметить, что температура является фактором реверсивного действия, который при наличии достаточного количества мальтеновой фракции в битумной матрице асфальтобетона (рисунок 3.2) положительно сказывается на процессе залечивания, тогда как при ее недостатке температура является условием старения вяжущего и не способствует процессу самопроизвольного сращивания молекул (рисунок 3.3). Собственный потенциал самозалечивания для образцов асфальтобетона на основе битуме БНД<sub>2</sub>, значительно меньше, чем для образцов асфальтобетона на основе битуме БНД<sub>1</sub>.

Реверсивный эффект влияния температуры очевиден при увеличении времени ее воздействия. Временной фактор для образцов на основе битуме БНД<sub>1</sub> является положительным, однако при повышенных значениях темпера-

тур, его положительное влияние уменьшается. В условиях меньшего содержания легких фракций в битуме БНД<sub>2</sub> время воздействия температуры является отрицательным фактором, влияющим на собственный потенциал самовосстановления. В этом случае максимальные значения собственного потенциала самовосстановления асфальтобетона соответствуют границе исследуемого факторного пространства – экспозиции в течение 3 дней. Это обусловлено старением вяжущего и уменьшением мальтеновой части битума, в которой растворены асфальтено-смолистые комплексы, что способствует ухудшению реологических свойств и снижению подвижности молекул.

Стоит отметить, что способность битума к самозалечиванию является чувствительным свойством, так как уменьшение содержания парафиново-нафтеновых и ароматических соединений на 13,5 % приводит к значительному изменению степени влияния температуры и времени ее воздействия. Учитывая отличия групповых составов применяемых битумов (таблица 2.2), можно сделать вывод, что положительно на величину собственного потенциала самозалечивания оказывает большее содержание легких фракций. При этом в процессе выбора битума и подборе состава асфальтобетона необходимо учитывать физико-химические процессы взаимодействия вяжущего с минеральными компонентами, в результате которых происходит перераспределение фракций, и количество свободного битума также будет сказываться на показателе самозалечивания.

Существенное отличие значений собственного потенциала самозалечивания наблюдается при испытании образцов асфальтобетона с помощью различных схем приложения нагрузки и условий предварительного термостатирования. Условия термостатирования влияют на состояние асфальтобетона в момент приложения нагрузки. При термостатировании в условиях отрицательной температуры в асфальтобетоне преобладают свойства упругого тела и в процессе нагружения образец не деформируется, а разрушается на две части хрупко с четким контуром поверхностей дефекта. В процессе сжатия при температуре 20

°С работа, совершаемая при разрушении, частично затрачивается на деформирование образцов, проявляющих упругопластические свойства. При этом испытанные образцы при сжатии характеризуются остаточной прочностью, так как максимальная зафиксированная нагрузка не приводит к полному разрушению структурных связей в асфальтобетоне. Магистральная трещина поперек образца полуцилиндра, образованная в результате изгибе, обуславливает отсутствие остаточной прочности и при повторном испытании на изгиб сопротивление образца нагрузке зафиксировано не будет. Таким образом, схема проведения испытаний влияет как на специфику дефектов, формирующихся в образцах, так и способствует созданию различных начальных условий для дальнейшего процесса самозалечивания.

Стоит отметить, что при испытании образцов асфальтобетона на изгиб значения показателя собственного потенциала самозалечивания больше, чем при испытании при сжатии для двух видов битумов. Причинами повышенных значений собственного потенциала самозалечивания является два основных аспекта. В-первую очередь это хрупкое состояние материала и характер дефекта образующегося при изгибе. При разрушении образца формирующиеся поверхности магистральной трещины имеют схожий рельеф без значительных деформаций, что способствует хорошей их стыковке в период отдыха. Во-вторых, зазор между поверхностями дефекта способствует непосредственному их разогреву при термостатировании, тогда как разогрев поверхностей дефектов в объеме образца происходит с некоторым градиентом. Таким образом, размеры испытываемых образцов, состояние образцов при испытании, особенности формирования дефектов являются факторами, влияющими на значения определяемого показателя самозалечивания, которые должны учитываться при разработке новых способов реализации технологии самовосстановления и единого метода измерения показателей самозалечивания.

Групповой состав используется для расчета Colloidal Instability Index битумов, который представляет собой отношение суммы концентрации асфальте-

нов и парафинонафтеновых соединений к сумме концентраций смол и ароматических соединений:

$$CII = \frac{As+S}{R+Ar} \quad (4.2)$$

где  $A_s$  – содержание асфальтенов, %;  $S$  – содержание парафино-нафтеновых соединений, %;  $R$  – содержание смол, %;  $A_r$  – содержание ароматических соединений, %.

Индекс дает представление о пептизирующей способности и его меньшие значения свидетельствуют о большей стабильности структуры битума. В работе [188] отмечалось, что меньшие значения  $CII$  соответствуют более высоким скоростям самозалечивания, поскольку молекулы с менее разветвленной структурой являются более подвижными. Для исследуемых битумов значения  $CII$  отличаются незначительно, для БНД<sub>1</sub> – 0,41, а для БНД<sub>2</sub> – 0,40. Таким образом, доминирующее значение в вопросе самозалечивания битума среди мальтенов играют именно ароматические соединения. Это может быть связано с очередностью перехода в расплав отдельных фракций битума при повышении температуры: ароматические соединения, имея меньшую температуру размягчения, что обуславливает большее участие их молекул в свободном тепловом движении, чем молекул смол.

Также амфотерная природа битума и ароматичность играет важную роль при формировании цепей в структуре, влияя на способность взаимодействовать в нескольких местах [189]. В соответствии с [189] увеличение кислотно-основной поверхностной энергии и снижение поверхностной энергии Лифшица-Ван-дер-Вальса происходит в битуме с низким содержанием амфотерных веществ и высоким содержанием ароматических соединений. Это подтверждает важность влияния большей концентрации ароматических соединений на диффузию, молекулярную подвижность и, следовательно, самозалечивание [190...195].

## 4.2 Модель функционирования капсулированного модификатора в асфальтобетонной смеси

Развитие технологии самовосстановления с применением капсулированного модификатора в асфальтобетонах сопряжено с рядом сложностей обусловленных производственными особенностями. Капсулы, содержащие восстанавливающий агент, при использовании в составе асфальтобетонной смеси должны обладать термической стойкостью (см. раздел 3.3) и достаточной прочностью для обеспечения целостности в процессе приготовления смеси и ее уплотнения, соответственно. В случае если максимальная нагрузка, которую способны выдержать капсулы при уплотнении, меньше минимальной нагрузки, необходимой для уплотнения асфальтобетонной смеси, восстанавливающий агент будет преждевременно попадать в матрицу материала, что в некоторых случаях может приводить к разуплотнению смеси или снижению сдвиговой устойчивости. При этом избыточная прочность будет препятствовать разрушению капсул и самовосстанавливающий процесс не будет инициирован в период эксплуатации.

Исследования рецептурно-технологических свойств суспензий, из которых осуществляется производство кальций-альгинатных капсул, показал, что регулирование состава суспензий, позволяет осуществлять управление размером и толщиной стенок капсул, а соответственно, и физико-механическими свойствами, в том числе прочностью [144].

Рассматривая капсулы как сферическую оболочку, расположенную в объеме матрицы с различными структурно-механическими свойствами, ее стенки подвергаются как внешнему, так и внутреннему давлению. Сила, которая действует изнутри на стенки в течение всего жизненного цикла капсулы, является постоянной, а величина давления на внешнюю сторону оболочки изменяется в процессе структурных преобразований матрицы [144].

При этом общее давление на стенку (оболочку) капсулы будет определяться результирующей силой  $P = P_{ex} + P_{in}$ , где  $P_{ex}$  – внешнее давление, зави-

сящее от свойств матрицы, в которой находится капсула и условий внешнего воздействия;  $P_{in}$  – внутреннее давление, зависящее от объема восстанавливающего агента и его свойств. Так же принято условие, что стенки капсул под нагрузкой проявляют в основном упруго-хрупкие свойства, а давление, возникающее на поверхности капсул, равномерно распределяется через прослойку битумного вяжущего.

В процессе жизненного цикла от приготовления асфальтобетонной смеси до этапа ее уплотнения и эксплуатации дорожного покрытия капсулы с восстанавливающим агентом находятся в различных напряженных состояниях, что обуславливается термопластичными свойствами матрицы композита.

На этапе приготовления асфальтобетонной смеси расплав битумного вяжущего обеспечивает вязко-текучие свойства материала [196...198], за счет чего при приложении нагрузки вращающимися механизмами смесителя частицы дисперсной фазы способны без значительного сопротивления перемещаться в объеме. В этом случае возникающие усилия не приводят к концентрации напряжений в области капсул, а расходуются преимущественно на преодоление вязкого сопротивления матрицы движению отдельных частиц дисперсной фазы.

На этапе уплотнения асфальтобетонной смеси термопластичная матрица находится в вязко-пластичном состоянии, в соответствии с законом Паскаля [199], при равномерном распределении и полном обволакивании расплавом вяжущего зерен дисперсной фазы, способствует равномерному распределению давления через прослойки битума на общую площадь поверхности минеральной части:

$$\sigma_c = p/S_{f,i}, \quad (4.3)$$

где  $p$  – давление, передаваемое на поверхность покрытия при уплотнении смеси, Н;  $S_{f,i} = S_{u,i}m_f = \sum_{i=1}^n \frac{6 \cdot C_i}{\rho_f d_{f,i}} 10^4$  – площадь поверхности, которая образует

дисперсная фаза, где  $S_{u,i}$  – удельная поверхность;  $\rho_f$  – средняя плотность дисперсной фазы;  $d_{f,i}$  – диаметр частицы;  $C_i$  – содержание частиц диаметром  $d_{f,i}$ .

Важным условием получения эффективного асфальтобетона является приложение необходимого давления при уплотнении, обеспечивающего требуемую структуру с заданным значением показателя пористости. В зависимости от давления при уплотнении асфальтобетонной смеси форсируется различный по структуре асфальтобетон. При уплотнении асфальтобетонной смеси происходит сближением зерен минерального заполнителя в результате их перегруппировки, межзерновые пустоты заполняются битумом в результате его перераспределения, вследствие чего увеличивается плотность асфальтобетона и формируется структура с оптимальным содержанием пустот.

С учетом изложенного, эффективные капсулы для самовосстанавливающегося асфальтобетона должны быть устойчивы к давлению ( $P_c$ ) или напряжениям ( $\sigma_c$ ), вызванным этим давлением, которые возникают в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси. При этом разрушение капсул должно происходить при давлении ( $P_o$ ) или напряжениях ( $\sigma_o$ ), возникающих в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Тогда область оптимальных значений, при которых достигается целостность капсул при уплотнении и хрупкость при эксплуатации определяется из условия  $P_c < P \leq P_o$  или  $\sigma_c < \sigma \leq \sigma_o$ .

Определение значения уплотняющей нагрузки позволит оптимизировать производство капсул с учетом полученных граничных значений является актуальной задачей при реализации технологии самовосстановления с использованием капсулированного модификатора.

При уплотнении асфальтобетонной смеси на капсулы с восстанавливающим агентом оказывает воздействие давление, что можно представить в виде схемы с действующими напряжениями по трем направлениям осевому ( $\sigma_t$ ), радиальному ( $\sigma_r$ ) и меридиональному ( $\sigma_m$ ) (рисунок 4.4). Распределение напряжений показано в виде эпюр.



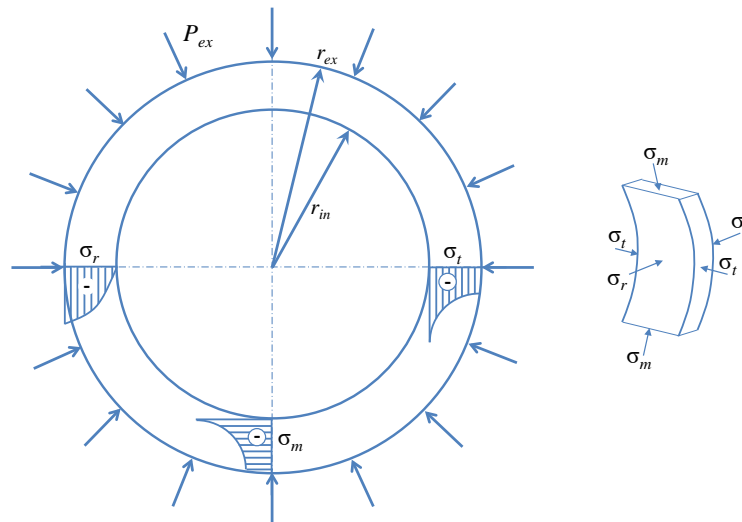


Рисунок 4.4 – Модель напряженного состояния капсул при уплотнении асфальтобетонной смеси

Принимается, что максимальное допустимое значение давления при уплотнении асфальтобетонной смеси  $p_{com}$  будет соответствовать тому значению, при котором достигается предел прочности при сжатии материала  $\sigma_u$  стенок капсулы на ее внутренней поверхности:

$$p_{com} = \frac{\sigma_u}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_B^2}{r_H^2}\right) = 2\sigma_u \frac{h}{D} \left(1 - \frac{h}{D}\right), \quad (4.4)$$

при  $r_H = D/2$  и  $r_B = D/2 - h$ , где  $D$  – диаметр капсулы,  $h$  – толщина стенки капсулы.

В процессе уплотнения смеси происходит распределение нагрузок и капсулы подвергаются равномерному и всестороннему гидростатическому сжатию, в результате которого предельное состояние в материале наступит при напряжениях по всей толщине стенок капсул равных пределу прочности при сжатии.

В соответствии с [200] напряжения и деформации сферического тела зависят только от координат в радиальном направлении, а уравнение равновесия содержит три действующих напряжения:

$$(\sigma_r - \sigma_t) + (\sigma_r - \sigma_m) + r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} = 0. \quad (4.5)$$

В предельном состоянии  $(\sigma_r - \sigma_t) = (\sigma_r - \sigma_m) = \sigma_u$ , при граничных условиях  $\sigma_r(r_H) = -p$  и  $\sigma_r(r_B) = 0$  величина предельного давления при уплотнении смеси рассчитывается в соответствии с формулой:

$$p_T \cong 4\sigma_u \cdot \frac{h}{D} \cdot \left(1 - \frac{h}{D}\right)^{-1}. \quad (4.6)$$

При капсулировании восстанавливающего агента основной задачей с учетом прочности материала стенок капсулы является сформировать необходимые ее геометрические параметры ( $h/D$ ), при которых обеспечивается прочность капсул, превышающая распределенную нагрузку при уплотнении (рисунок 4.5).

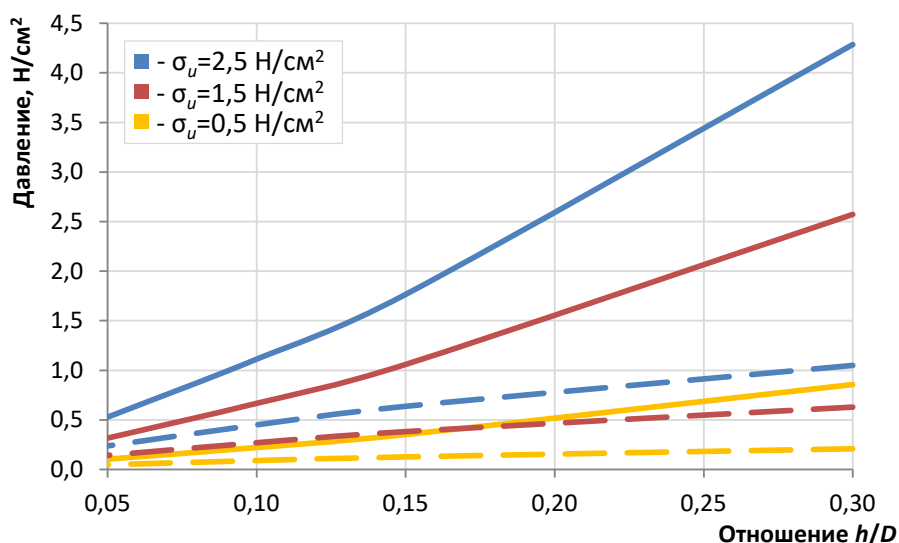


Рисунок 4.5 – Изменение теоретической прочности капсул (сплошная линия) и максимального давления уплотнения (штриховая линия) от  $h/D$  при различной прочности материала капсулы

Результаты расчета показывают, что регулирование толщины и/или диаметра капсул с восстанавливающим агентом, позволяет синтезировать капсулированный модификатор с заданной прочностью для обеспечения необходимой стойкости к давлению в процессе уплотнения. Увеличение толщины стенок

капсул приводит к закономерному увеличению прочности капсул и максимально допустимого давления при уплотнении. Теоретическая прочность закономерно выше максимально допустимого давления в процессе уплотнения, так как при ее расчете не учитываются дефекты, распределенные в материале оболочки капсулы. Очевидно, что с увеличением объема оболочки (доли оболочки в объеме капсулы), вероятность возникновения критического дефекта возрастает (эффект Вейбулла). Однако эта вероятность все же меньше увеличения прочности, которое происходит при росте оболочки капсулы. Чем выше прочность материала стенок капсул, тем выше прочность капсулы и соответственно максимально допустимое давление в процессе уплотнения. При этом прочность материала капсул и их геометрические параметры должны обеспечивать получение значения максимально допустимого давления в процессе уплотнения, которого превышает фактическое значение распределенной нагрузки на суммарную площадь дисперсной фазы в смеси.

Учитывая ранее полученные граничные условия по прочности капсул (рисунок 4.5), необходимой для выдерживания уплотнения асфальтобетонной смеси, установлено, что капсулы с оптимальным составом обладают необходимым запасом прочности (рисунок 4.6).

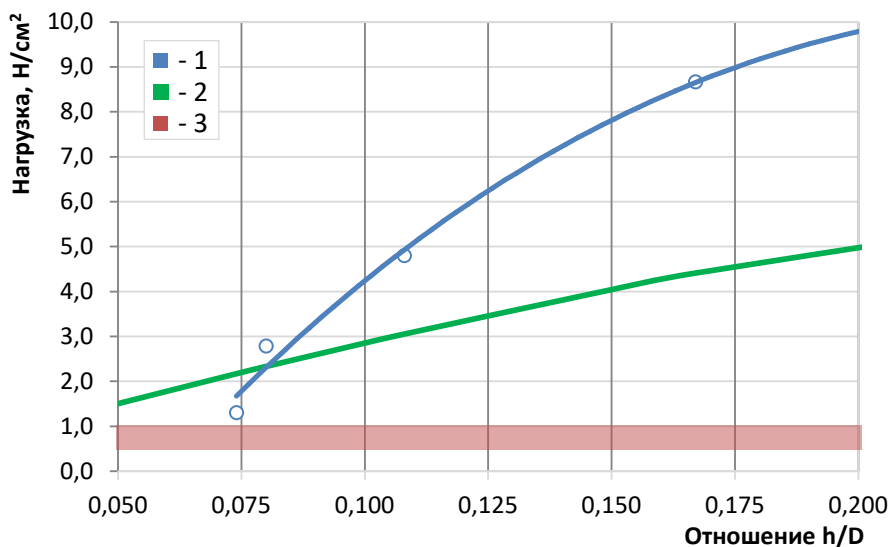


Рисунок 4.6 – Влияние отношения  $h/D$  на показатели: 1 – фактическая прочность капсул; 2 – теоретическое допустимое давление при уплотнении смеси; 3 – зона фактической максимальной распределенной нагрузки

Для подтверждения полученных расчетных и теоретических результатов образцы асфальтобетона с капсулированным модификатором исследовались с использованием метода рентгеновской томографии. Исследования проводились на томографе V|TOME|X M300, General Electric, с помощью которого «последовательно» осуществлялось сканирование образца с дальнейшим преобразованием 2400 снимков сечения в 3-D модель (рисунок 4.7).

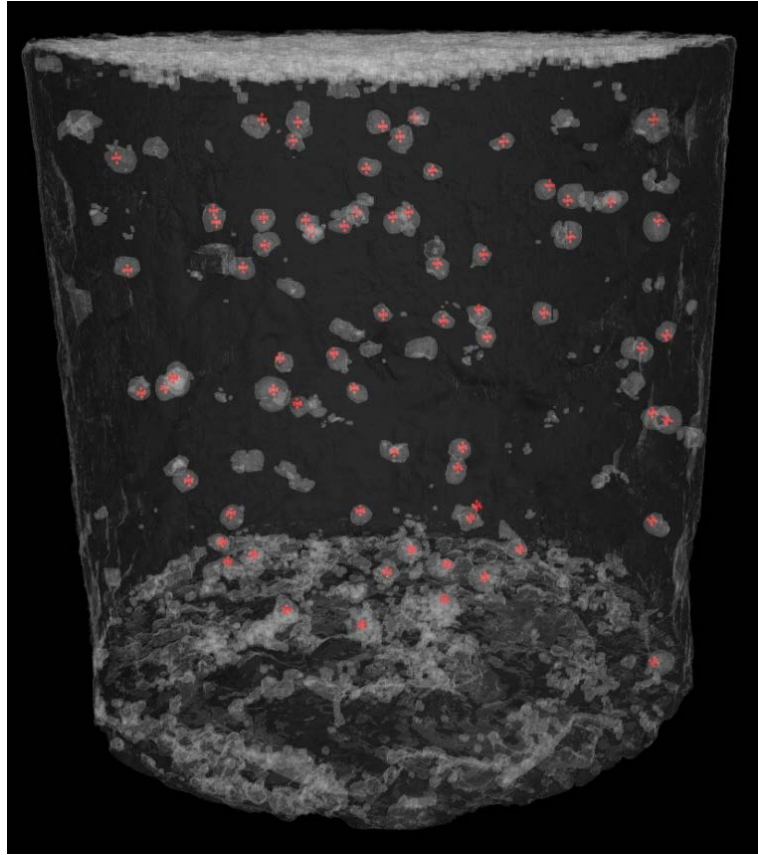


Рисунок 4.7 – 3D-визуализация томографических изображений асфальтобетона с капсулами

Результаты исследования образца до и после испытания на прочность представлены на рисунке 4.8.

Анализ 3D-моделей (рисунок 4.7), полученных с помощью томографии, показывает, что большинство капсулы после завершения процесса приготовления смеси и ее уплотнения остаются целостными (рисунок 4.8а).

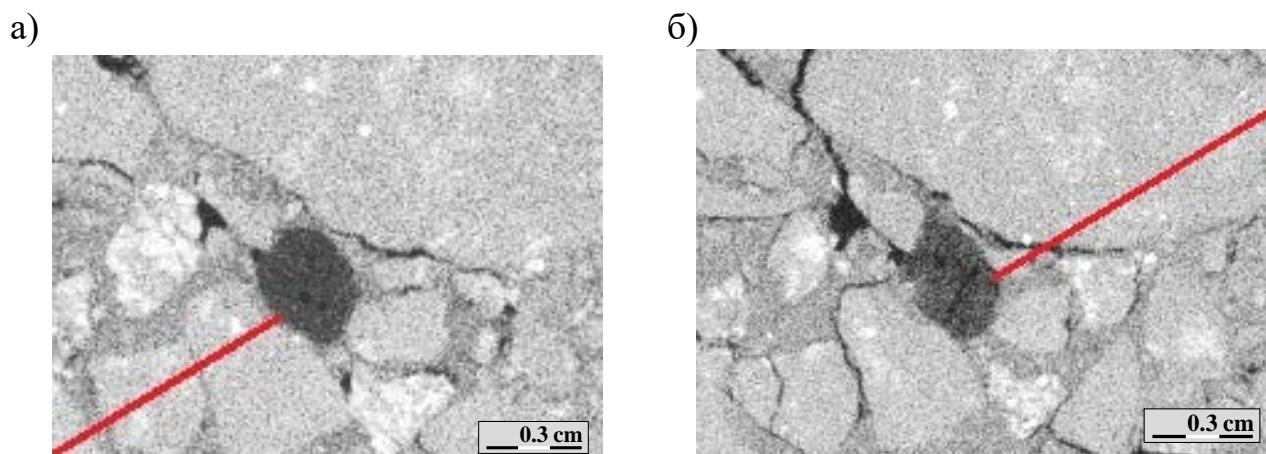


Рисунок 4.8 – Сравнительные томографические изображения образцов асфальтобетона с капсулированным модификатором до (а) и после испытаний на прочность (б)

После испытания образцов асфальтобетона наблюдается, что часть капсул была разрушена (рисунок 4.8 б), так как в упругой матрице являлись местом концентрации напряжений. Стоит отметить, что после испытаний в структуре асфальтобетона остается незначительная часть капсул, которые не были разрушены и потенциал их восстанавливающего агента может быть дополнительно реализован при дальнейшем накоплении напряжений.

#### **4.3 Структура и свойства самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором**

Для реализации технологии самовосстановления в асфальтобетоне с использованием AR-полимера, представляющего из себе уретановой тиолсодержащий полимер с концевыми меркаптановыми группами (SH-), отвердителем для полимеризации которого является компонент Б. Для обеспечения реализации технологии необходимо наличие компонента Б в составе матрицы изготавливаемого асфальтобетона, что при высвобождении AR-полимера из капсул в период формирования дефектов, будет обеспечивать ускорение процесса его полимеризации, способствуя ликвидации дефектов за счет их склеивания. С учетом сформулированного предположения необходимо определение опти-

мального содержания компонента Б в составе матрицы изготавливаемого асфальтобетона.

Для этого из стандартных образцов-цилиндров ЩМА-15 с различным содержанием компонента Б изготавливались полуцилиндры для испытания на изгиб при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После определения предела прочности при изгибе ( $R_0$ ) при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , образовавшиеся две части образца совмещались поверхностями дефекта друг к другу с помощью жгута. При этом перед совмещением частей образцов AR-полимер наносился на каждую поверхность дефекта (разлома). Далее образцы в течение 14 дней находились без нагрузки при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После периода «отдыха» для образцов-полуцилиндров повторно определялся предела прочности при изгибе ( $R_i$ ) при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты определения относительной прочности  $R_i/R_0$  представлены на рисунке 4.9.

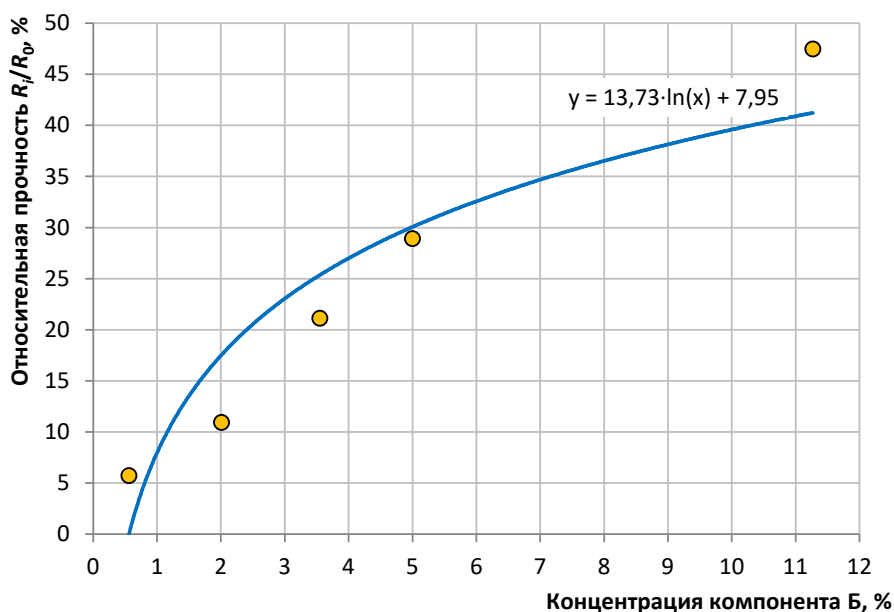


Рисунок 4.9 – Зависимость относительной прочности  $R_i/R_0$  от концентрации компонента Б в составе асфальтобетона

Анализ рисунка показывает, что при увеличении содержания активатора в составе асфальтобетона происходит увеличение интенсивности полимеризации AR-полимера, которым были склеены две половинки исследуемых образ-

цов. Следствием этого является увеличение предела прочности при изгибе образцов после 14 суток и соответственно показателя относительной прочности. Изменение относительной прочности  $R_i/R_0$  описывается логарифмическим уравнением, что свидетельствует о снижении интенсивности возрастания показателя при больших концентрациях. Очевидно, что чем больше общая концентрация, тем меньше вклад единицы объема компонента Б в изменение показателя  $R_i/R_0$  (рисунок 4.10).

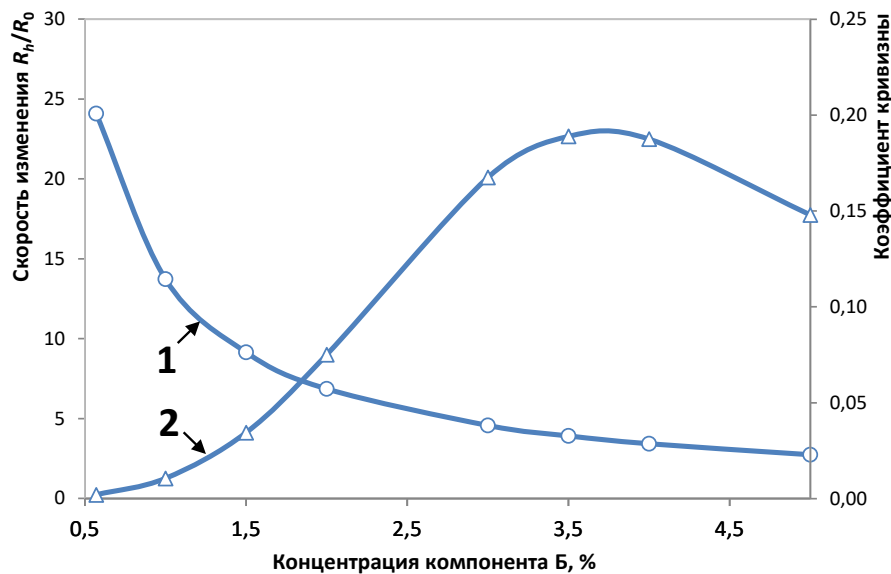


Рисунок 4.10 – Зависимость скорости изменения  $R_i/R_0$  (1) и коэффициент кривизны (2) от концентрации компонента Б

Анализ рисунка 4.10 свидетельствует, что при увеличении концентрации компонента Б (активатора) более 3,5 % от массы битума в составе асфальтобетонной смеси, происходит уменьшение эффективности действия единицы его объема. Поэтому для дальнейших исследований концентрация активатора 3,5 % от массы битума в составе разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимером принята как оптимальная.

Технология самовосстановления, реализуемая с применением капсулированного модификатора, направлена на инициирование вторичного процесса структурообразования в период эксплуатации, в результате которого происходит формирования дополнительных структурных связей. В результате реализа-



ции такого подхода происходит восстановление баланса структурных связей и состояния структуры материала способно функционировать в дорожной конструкции.

Использование достаточного количества капсулированного модификатора позволит восстановить большее количество структурных связей, чем за счет собственного восстановительного потенциала вяжущего. Для исследования восстановительного эффекта для асфальтобетонов, приготовленных на основе битума и комплексного вяжущего, использовался капсулированный модификатор на основе органического восстановителя и AR-полимера.

Для определения оптимального содержания капсулированного модификатора изготавливались смеси с содержанием капсул 1,5 %; 3,0 %; 4,5 %; 9,0 % и 13,5 % от массы битума, которые добавлялись на этапе смешивания сухих компонентов. Оценка изменчивости показателя прочности при использовании капсулированного модификатора осуществлялась на следующие сутки после изготовления образцов, а также на 7; 14 и 21 сутки. При этом после каждого определения предела прочности при сжатии при температуре 20 °С испытываемые образцы хранились в нормальных условиях для обеспечения этапа восстановления.

Результаты определения предела прочности при 4 последовательных циклах испытаний при сжатии и периодах восстановления асфальтобетона с различным содержанием капсулированного модификатора на основе органического восстановителя представлены таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Предел прочности при сжатии асфальтобетона с капсулированным модификатором

Содержание капсул, %	Предел прочности при сжатии через сутки, МПа			
	1	7	14	21
–	2,96	2,22	1,75	1,58
	4,02	3,40	3,03	2,91
1,5	2,81	2,29	1,95	1,83
	3,70	3,33	2,99	2,92
3,0	2,72	2,22	1,92	1,81
	3,59	3,25	3,17	3,06
4,5	2,57	2,04	1,80	1,66
	3,55	3,20	3,06	2,91
9,0	2,25	1,86	1,56	1,43
	3,42	2,86	2,60	2,38
13,5	2,02	1,62	1,40	1,30
	3,35	2,81	2,57	2,27

Примечание: в числителе - значения для капсулированного модификатора на основе органического восстановителя; в знаменателе - значения для капсулированного модификатора на основе AR-полимера

Эффект восстановления при применении капсулированного модификатора обуславливается частичным восстановлением количества структурных связей, которые обеспечивают состояние структуры сопротивляться большим нагрузкам, чем до процесса восстановления. С применением капсулированного модификатора на основе органического вяжущего за период восстановления показатель прочности больше, чем у контрольных образцов асфальтобетона. Это объясняется механизмом действия органического восстановителя, который после высвобождения из капсул диффундирует в битумную матрицу, растворяется в ней, снижая хрупкость и увеличивая подвижность молекул вяжущего,

что способствует снижению поверхностного натяжения на границе трещины и ее залечиванию. В результате этого процесса количество связей в композите за счет новых, сформированных в результате самопроизвольного спутывания длинных цепей молекул, увеличивается, что способствует большей сопротивляемости к нагрузкам. При этом при увеличении содержания капсул с органическим восстановителем наблюдается уменьшение прочности, что может быть связано с недостаточным положительным эффектом омоложения вяжущего для компенсации негативного эффекта от капсул в структуре композита.

Для асфальтобетонов при использовании капсулированного модификатора на основе AR-полимера за период восстановления показатель прочности больше, чем у контрольных образцов асфальтобетона без капсул. Механизм действия восстановителя на основе полимера заключается в смачивании поверхности дефекта, частичной диффузии внутрь матрицы, полимеризации и «склеивании» трещины. При этом изменение прочности асфальтобетона от содержания капсулированного модификатора имеет экстремальную зависимость. Это обуславливается недостатком восстановителя для смачивания поверхности дефекта и склеивания его при небольших концентрациях. С увеличением содержания капсул количество AR-полимера «склеивающего» дефект возрастает, и количество новых структурных связей возрастает. Дальнейшее увеличение содержания капсул приводит к снижению эффективности, так как над положительным эффектом от «склеивания» начинает преобладать негативный эффект от капсул в структуре композита. Результаты расчета представлены на рисунке 4.11.

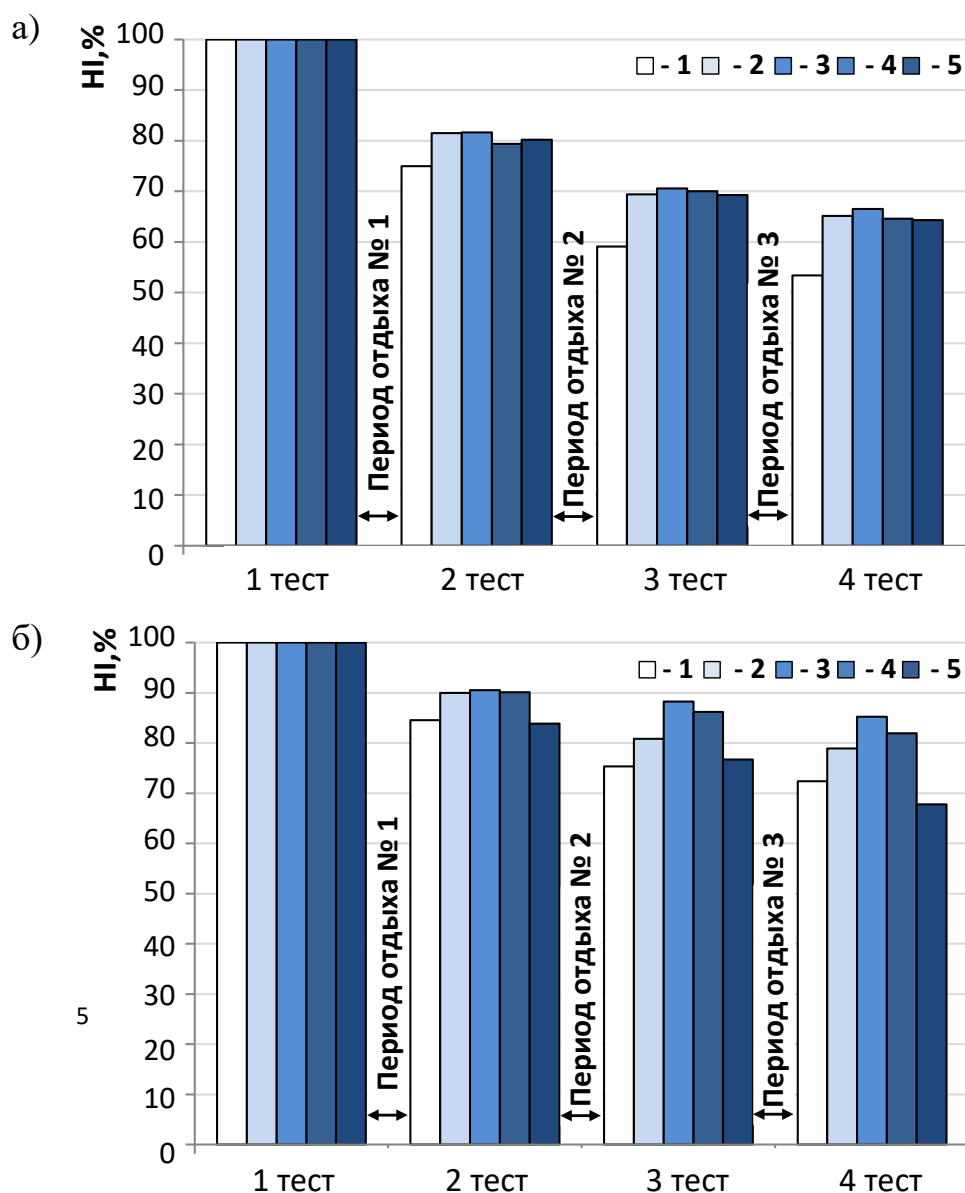


Рисунок 4.11 – Изменение прочности АБ после повторных испытаний на сжатие с различным содержанием капсулированного масла (а) и AR-полимера (б):

1 – без капсул; 2 – 1,5 %; 3 – 3,0 %; 4 – 4,5 %; 5 – 9,0 %

Результаты анализа рисунка показывают, что увеличение в составе асфальтобетона содержания капсул, содержащих органический восстановитель и AR-полимер, приводит к закономерному снижению показателя прочности. Это объясняется увеличением в объеме материала доли структурных элементов, обладающих меньшей прочностью, чем минеральные компоненты. Кроме того, такие капсулы могут рассматриваться как дополнительные дефекты структуры (до реализации их функционального использования), что идентично снижению

концентрации структурных связей в материале. Согласно уравнению Ребиндера уменьшение структурных связей  $N_{st}$  при увеличении количества дефектов  $v_p$  ( $v_p$  – объемная доля дефектов) будет равно:

$$\Delta N_{st} = B_0 \Delta v_p, \quad (4.7)$$

где  $B_0 = \sqrt[m]{R_0/\gamma f_c}$ ;  $R_0$  – константа материала – прочность бездефектного материала;  $\gamma$  – константа;  $f_c$  – прочность единичной связи;  $m$  – показатель степени, характеризующий влияние концентрации связей на прочность материала (в уравнении Ребиндера  $m = 2/3$ ; в ряде исследований [201, 202] показано, что  $m > 2$ ).

Отсюда при равенстве  $\Delta v_p = v_k$  ( $v_k$  – объемная доля капсул) негативное влияние капсул на прочность материала очевидна.

При этом влияние содержания капсул на прочность асфальтобетона на битуме и битуме, содержащем компонент Б. Так, снижение прочности асфальтобетона на комплексном вяжущем при максимальной концентрации капсулированного модификатора в 1,9 раза меньше, чем для асфальтобетона на основе битума. Это обусловлено формированием более прочных структурных связей в композите с модифицированным битумным вяжущим, чем с битумом и начальная прочность ( $R_0$ ) на 36 % больше.

Общая потеря прочности после 4 тестов на сжатие для асфальтобетона на битуме составила 47 %, а в асфальтобетоне на основе битума с компонентом Б – 38 %, что свидетельствует о большей стойкости его структуры к повторным механическим воздействиям. При этом отмечается, что после каждого теста по определению предела прочности при сжатии образцы композита обладают остаточной прочностью. Это объясняется тем, что в момент до испытания совокупность связей обеспечивает стойкость композита к критическим нагрузкам, которая является предельно допустимым значением давления, определяемым во время теста. При этом в процессе нагружения часть структурных связей раз-

рушается, а часть после снятия нагрузки обеспечивает состояние структуры, которое характеризуется остаточной прочностью.

Так после четвертого тест по определению предела прочности при сжатии индекс восстановления для асфальтобетона с капсулированным модификатором на основе масла изменяется от 68 до 64 % при содержании от 1,5 до 13,5 %. Для асфальтобетона с содержанием капсулированного модификатора на основе AR-полимера 1,5 %; 3,0 %; 4,5 %; 9,0 %; 13,5 % индекс восстановления равен 79 %; 85 %; 82 %; 70 %; 68 %, соответственно. Данные индекс свидетельствует о достаточно высоком уровне восстановления прочности как при использовании капсулированного модификатора на основе органического восстановителя, так и AR-полимера. Однако данный индекс не учитывает два показателя: остаточную прочность, которая обуславливается наличием не разрушенных в результате теста связей и собственный потенциал вяжущего к восстановлению.

Более точным подходом для оценки восстановительного эффекта является учет изменения потери прочности асфальтобетона при использовании капсулированного модификатора. Учитывая, что индекс потери прочности представляет собой величину обратную индексу восстановления, который будет рассчитываться как  $1 - R_h/R_0$ . Таким образом, коэффициент восстановления, учитывающий относительную разницу потери прочности асфальтобетона с применением капсулированного модификатора и без него, рассчитывается по следующей формуле:

$$k_h = \frac{IR'}{IR} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

где  $IR' = 1 - R'_h/R'_0$  – индекс потери прочности асфальтобетона без капсул;  $IR = 1 - R_h/R_0$  – индекс потери прочности асфальтобетона с капсулированным модификатором;  $R'_0$  и  $R_0$  – показатель прочности асфальтобетона до восстановления без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно, МПа;  $R'_h$  и

$R_h$  – показатель прочности асфальтобетона после восстановления без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно, МПа.

Результаты расчета коэффициента восстановления, учитывающего относительную разницу потери прочности, асфальтобетона с применением капсулированного модификатора и без него представлены на рисунке 4.12.

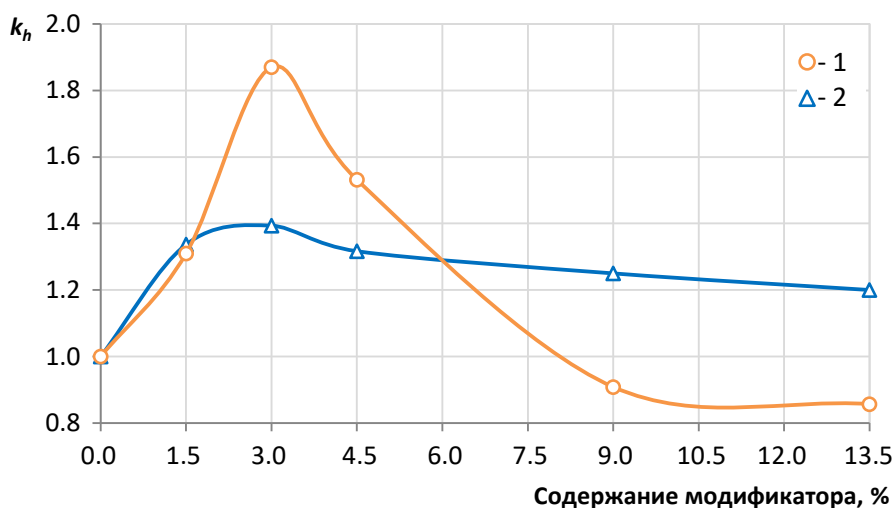


Рисунок 4.12 – Зависимость  $k_h$  от содержания капсулированного модификатора: 1 – AR-полимер; 2 – подсолнечное масло

Анализ зависимостей коэффициента восстановления от содержания капсулированного модификатора показывает, что при содержании 3 % капсул степень восстановления является максимальной, что обусловлено оптимальным содержанием в структуре асфальтобетона, при котором негативный эффект от их присутствия в объеме материала минимален и восстановительный эффект не компенсируется. При оптимальном содержании капсул с органическим восстановителем коэффициент восстановления показывает, что при повторном сжатии общие потери прочности с учетом действия модификатора оказались меньше на 28 %. Для асфальтобетона с оптимальным содержанием капсулированного модификатора на основе AR-полимера коэффициент восстановления отражает, что на общие потери прочности с учетом действия модификатора на 46 % меньше. При этом эффективность восстановления с применением капсулированного модификатора на основе AR-полимера в 1,87 раза больше чем при

использовании капсулированного модификатора на основе органического восстановителя.

Таким образом, оптимальным содержанием капсулированного модификатора, обеспечивающим максимальный восстановительный эффект асфальтобетона является 3 %. Дальнейшие исследования самовосстанавливающегося асфальтобетона проводились на составах с оптимальным содержанием капсулированного модификатора.

Очевидно, что для оценки способности самовосстановления асфальтобетона необходимо учитывать дополнительные показатели свойств, характеризующие эффективность этого процесса. С этой целью в работе осуществлялось исследование скорости самовосстановления и стойкости структуры материала после самовосстановления.

Закономерно предполагать [184, 197], что наличие способности самовосстановления для асфальтобетонов будет способствовать увеличению срока функционального соответствия материала необходимым требованиям. С целью установления стойкости асфальтобетона после самовосстановления образцы-цилиндры подвергались повторным испытаниям на сжатие для оценки времени достижения критического значения структурно-чувствительного параметра. Изготовленные образцы асфальтобетона испытывались при сжатии, после этого образцы в течение 7 дней хранились при температуре 20 °С, затем повторно подвергались сжатию. Испытание образцов на сжатие повторялись 3 раза через каждые 7 суток. График изменения прочности представлен на рисунке 4.13.



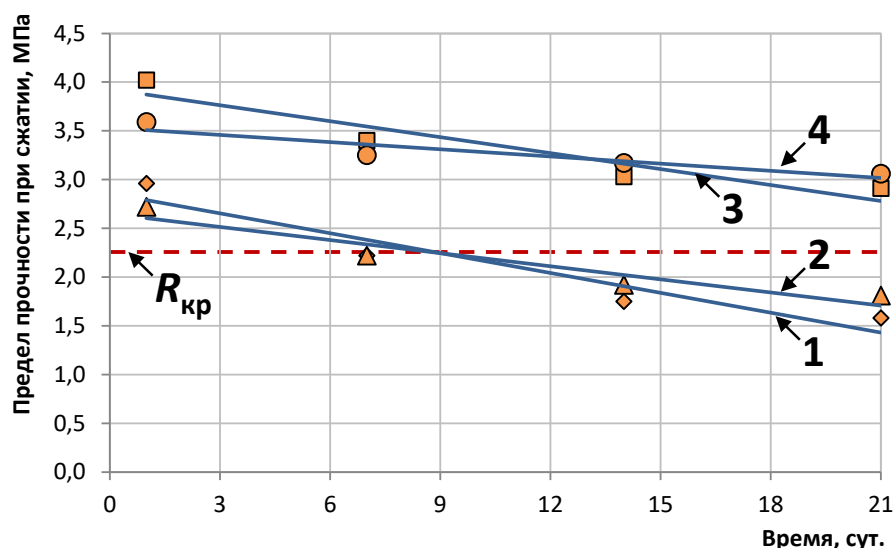


Рисунок 4.13 – Кинетика изменения прочности при повторных испытаниях на сжатие образцов ЩМА: 1 – контрольный состав; 2 – с капсулированным маслом; 3 – с компонентом Б; 4 – с компонентом Б и капсулированным AR-полимером

Эмпирические коэффициенты уравнений регрессии использовались для расчета коэффициент выхода из строя (формула 2.7), отражающего время достижения критического значения структурно-чувствительного параметра (принято  $R_{сж} = 2,2$  МПа, в соответствии с ГОСТ 31015 для ЩМА-15, эксплуатируемых в II, III погодно-климатической зоне), которые представлены в таблице в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Расчет коэффициента выхода из строя

№	Состав	Модификатор	Значение коэффициентов		$k_D$
			$b_0$	$b_1$	
1	ЩМА-15	–	2,86	-0,0861	–
2		Капсулированное масло	2,65	-0,0447	1,05
3	ЩМА-15 с компонентом Б	–	3,93	-0,0546	–
4		Капсулированный AR-полимер	3,53	-0,0246	1,7

Результаты расчета относительной скорости достижения критического значения структурно-чувствительного параметра показывает, что для образцов асфальтобетона с капсулами с AR-полимером за счет процессов самовосстановления период выхода из строя больше. При этом коэффициент выхода из строя, рассчитанный относительно ЦМА без капсул, но с компонентов Б в составе равен 1,7, а относительно ЦМА контрольного состава – 5,6. Данные результаты свидетельствуют, что разработанный асфальтобетон с капсулированным AR-полимером является более стойким в условиях повторяющихся механических нагрузок за счет процессов самовосстановления.

Для оценки скорости протекающего процесса самовосстановления в асфальтобетоне осуществлялось исследование кинетики изменения структурно-чувствительного показателя, в качестве которого рассматривался предел прочности при сжатии. Результаты определения кинетики изменения предела прочности при сжатии представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Изменение предела прочности при сжатии

№	Состав	Модификатор	Предел прочности при сжатии через время, сутки			
			0	1	3	7
1	ЩМА-15	–	2,96	1,91	2,16	2,22
2		Капсулированное масло	2,72	1,72	1,99	2,22
3	ЩМА-15 с компонентом Б	–	4,02	3,07	3,37	3,4
4		Капсулированный AR-полимер	3,59	2,57	2,84	3,25

Очевидно, что в течение 7 суток происходят процессы самовосстановления в образцах асфальтобетона как контрольного состава, так и с капсулированным модификатором. Это обусловлено собственным потенциалом к самовосстановлению асфальтобетона за счет термопластичных свойств вяжущего,

что было доказано в разделе 4.1 и процессом самовосстановления за счет капсулированного модификатора.

Для оценки скорости процесса самовосстановления оценивалась кинетика изменения относительной прочности  $R_h/R_0$  (здесь  $R_h$  – прочность после самовосстановления,  $R_0$  – начальная прочность), которая представлена на рисунке 4.14.

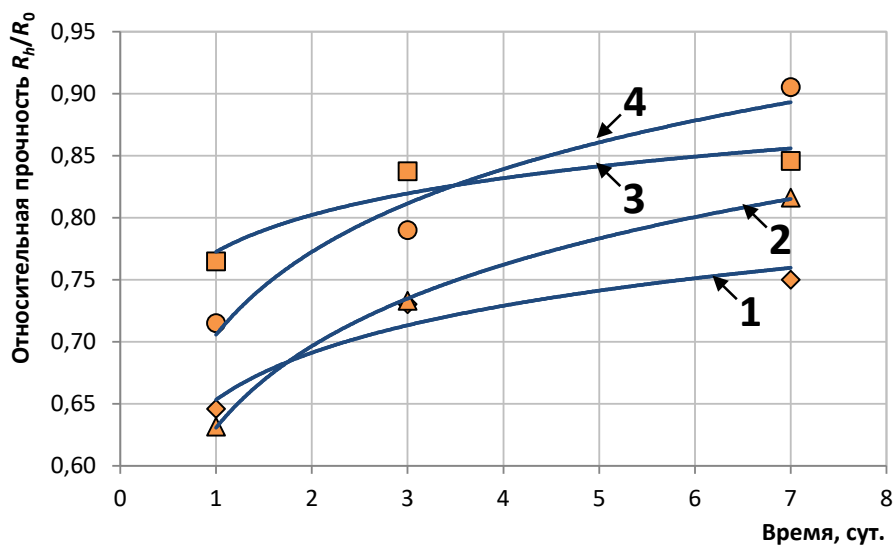


Рисунок 4.14 – Кинетика изменения относительной прочности при сжатии образцов ЩМА: 1 – контрольный состав; 2 – с капсулированным маслом; 3 – с компонентом Б; 4 – с компонентом Б и капсулированным AR-полимером

Анализ полученных зависимостей показывает, что в течение наблюдаемых 7 суток происходит увеличение показателя относительной прочности, характеризующей увеличение эффекта самовосстановления во времени. При этом данный процесс характерен как для образцов асфальтобетона без капсулированного модификатора (линии 1 и 3 на рисунке 4.14), так и с капсулами в составе (линии 2 и 4 на рисунке 4.14). Этот процесс обуславливается собственным потенциалом к самовосстановлению за счет тиксотропии и термопластичных свойств вяжущего. Добавление капсулированного модификатора способствует ускорению процесса самовосстановления, что доказывает его положительное влияние на восстановление способности сопротивляться механическим нагрузкам. Для количественной оценки скорости самовосстановления и влияния кап-

сулированного модификатора на указанный процесс производился регрессионный анализ (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Параметры уравнений регрессии изменения относительной прочности

№	Состав	Модификатор	Значение эмпирических коэффициентов		Коэффициент детерминации $R^2$
			$a$	$b$	
1	ЩМА-15	–	0,0546	0,6533	0,93
2		Капсулированное масло	0,0948	0,6308	0,99
3	ЩМА-15 с компонентом Б	–	0,0428	0,7726	0,89
4		Капсулированный AR-полимер	0,0964	0,7056	0,96

Изменения относительной прочности  $R_n/R_0$  описывается логарифмической зависимостью в соответствии с регрессионной моделью  $f(x)=a\ln(x)+b$ , где эмпирические коэффициенты описывают скорость изменения ( $a$ ) и начальное значение показателя ( $b$ ). Указанная модель свидетельствует о непостоянной скорости изменения относительной прочности  $f'(x)$  (рисунок 4.15).

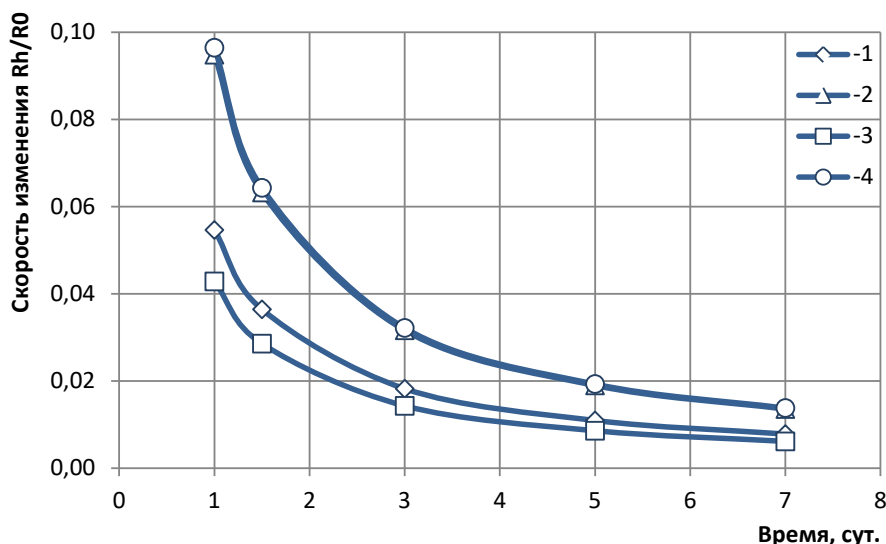


Рисунок 4.15 – Скорость изменения относительной прочности при сжатии образцов ЩМА: 1 – контрольный состав; 2 – с капсулированным маслом; 3 – с компонентом Б; 4 – с компонентом Б и капсулированным AR-полимером

Анализ рисунка 4.15 свидетельствует, что восстановительный процесс преимущественно протекает в начальный период в течение 3 суток, далее скорость изменения относительной прочности  $R_h/R_0$  стремится к минимальным значениям, что свидетельствует о замедлении процесса самовосстановления. Сопоставление значений коэффициента  $a$  (таблица 4.5) показывает, что с использованием капсулированного модификатора наблюдается увеличение скорости процесса самовосстановления (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Кратность увеличения скорости самовосстановления

Кратность увеличения скорости самовосстановления	Составы ЩМА (номер в соответствии с рис. 4.15)			
	1	2	3	4
$k_v = a_0/a_i$	1,00	1,74	0,78	1,77

Примечание: \*  $a_i$  – значения коэффициента  $a$  для модифицированных составов;  $a_0$  – значения коэффициента  $a$  для контрольного состава.

Графики изменения скорости самовосстановления можно охарактеризовать двумя этапами: начальный с интенсивным процессом самовосстановления и завершающий с замедлением процесса самовосстановления. На графиках характерными точками перехода процесса самовосстановления от первого этапа ко второму являются точки, которые определялись с учетом условия, что радиус кривизны кривой и совпадающий с радиусом соприкасающийся окружности в данной точке кривой должен быть минимальным. Величина, обратная радиусу кривизны ( $k=1/r$ ) есть кривизна кривой, которая рассчитывалась по формуле:

$$k(t) = \frac{|f''(t)|}{(\sqrt{1+f'(t)^2})^3} \quad (4.9)$$

где  $f'(t)$  и  $f''(t)$  – производные первого и второго порядка функции.

Результаты определения  $k(t)$  представлены на рисунке 4.16.

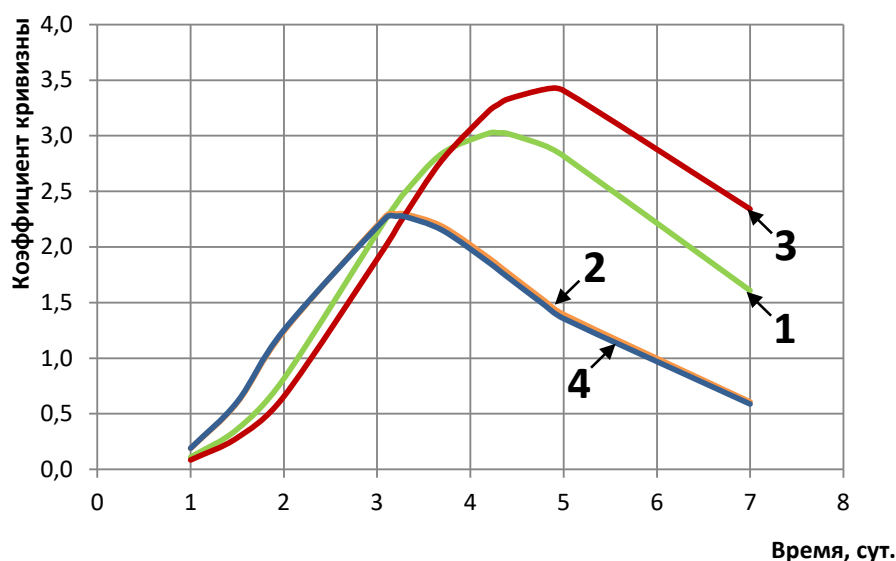


Рисунок 4.16 – Зависимость кривизны кривой скорости самовосстановления для образцов ЩМА: 1 – контрольный состав; 2 – с капсулированным маслом; 3 – с компонентом Б; 4 – с компонентом Б и капсулированным AR-полимером

Стоит отметить, что скорость самовосстановления асфальтобетона в присутствии капсулированного модификатора больше, чем в контрольных образ-

цах в 1,74...2,25 раза. При этом скорость процесса самовосстановления для ЩМА с капсулированным AR-полимером и ЩМА с капсулированным маслом описывается схожей зависимостью. Очевидно, присутствие в составе ЩМА компонента Б способствует снижению скорости самовосстановления, что может быть связано со структурирующим эффектом, оказываемым веществами из которых он состоит.

Таким образом, в результате исследования свойств, характеризующих способность асфальтобетона к самовосстановлению, показано, что использование капсулированного модификатора в составе смесей ЩМА способствует улучшению структурно-чувствительных показателей (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Значения критериев качества, отражающих самовосстановление асфальтобетонов

Наименование показателя	Символ	Ед. изм.	Значения для ЦМА-15		
			Контрольный	С капсулированным модификатором	
				Масло	AR-полимер
Коэффициент самовосстановления	$k_h$	–	1,00	1,40	1,93
Скорость самовосстановления	$k_v$	–	1,00	1,74	1,76
Коэффициент выхода из строя	$k_d$	–	1,00	1,05	1,70

Результаты определения коэффициента самовосстановления, отражающего интенсивность самовосстановления, коэффициента выхода из строя, отражающего стойкость структуры материала после восстановления, и скорости самовосстановления показывает, что в сравнении с традиционными ЦМА-15, асфальтобетон с капсулированным модификатором обладает большими значениями указанных показателей. При этом эффективность самовосстановления значительно выше у асфальтобетонов с капсулированным AR-полимером, чем у ЦМА, в составе которого использовалось капсулированное масло. Так коэффициент самовосстановления ЦМА с капсулированным AR-полимером на 37 % больше чем для ЦМА с капсулированным маслом и на 93 % больше чем для традиционного ЦМА-15. При схожей скорости процесса самовосстановления капсулированный AR-полимер также позволяет получать более стойкую структуру асфальтобетона после самовосстановления на 62 %, чем капсулированное масло и на 70 % больше чем у традиционного ЦМА-15.

Таким образом, доказано, что использование капсулированного AR-полимера в комбинации с активатором в составе щебеночно-мастичных смесей



позволяет обеспечить формирование способности материала к самостоятельному восстановлению структурно чувствительных показателей качества и соответственно его функциональности.

Важным условие эффективности применения капсулированного модификатора является обеспечение соответствия показателей свойств асфальтобетона требованиям нормативных документов. В настоящей работе исследовано изменение основных свойств асфальтобетона ЦМА-15 при использовании капсулированного модификатора. Очевидно, что присутствие в структуре асфальтобетонных элементов, капсул, обладающих относительно не высокой собственной прочностью, будет влиять на основные свойства материала. Основные свойства асфальтобетона без модификатора и с капсулированным восстанавливающим агентом представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Основные свойства асфальтобетонов

Наименование показателя	Ед. изм.	Требования ГОСТ	Значения для ЦМА-15		
			Контрольный	С модификатором	
				Масло	AR-полимер
1	2	3	4	5	6
Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	–	2,43	2,42	2,42
Пористость минеральной части	%	15...19	18	16	17
Остаточная пористость	%	1,5...4,5	3,0	1,7	1,8
Водонасыщение	%	1,0...4,0	1,9	1,2	1,3
Предел прочности при сжатии при: – 20 °С – 50 °С	МПа	не менее 2,2	3,0	2,8	3,6
		не менее 0,65	1,1	0,7	1,2
Сдвигоустойчивость: Коэффициент внутреннего трения Сцепление при сдвиге при 50 °С	–	не менее 0,93	0,94	0,92	0,93
	МПа	не менее 0,18	0,56	0,40	0,44
Предел прочности при расколе при 0 °С	МПа	2,5...6,0	2,60	2,2	3,1
Водостойкость (длительная)	–	не менее 0,85	0,92	0,89	0,90

Анализ таблицы 4.8 показывает, что выделение оптимального количества капсул с модификатором в состав ЦМА-15 не приводит к значительному изме-

нению средней плотности и пористости минеральной части. Остаточная пористость уменьшается при добавлении капсул, что обуславливается частичным заполнением межзерновых пустот в структуре асфальтобетона. Следствием этого является снижение водонасыщения. При этом изменение указанных показателей для различных модификаторов схоже, что, очевидно, указывает на отсутствие влияния вида модификатора на структуру и свойства асфальтобетона. Показатели предела прочности при введении капсул с подсолнечным маслом заметно снижаются. Асфальтобетон с капсулированным AR-полимером отличается большей прочностью по сравнению с контрольным составом, что обуславливается наличием в составе активных добавок, серы и оксида марганца. В результате в присутствии указанных веществ асфальтобетон характеризуется большей теплостойкостью и упругостью.

Таким образом, разрабатываемый материал, несмотря на незначительное снижение значений некоторых показателей качества асфальтобетона, отвечает всем требованиям ГОСТ 31015, предъявляемым к щебеночно-мастичным смесям и асфальтобетонам.

Эффективность материала, в том числе разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона представляет собой комплексную характеристику, которая учитывает вклад каждой группы показателей качества, отражающих соответствие требованиям нормативных документов и отражающих уникальные свойства материала, в том числе самовосстановление. С применением системного анализа и многокритериального подхода осуществлена оценка эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором путем расчета частных ( $k_i$ ) и обобщенного ( $F_k$ ) критериев качества (формула 2.15). Результаты расчета частных критериев качества представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Значения частных критериев качества, отражающих соответствие требованиям нормативных документов

Наименование показателя	Символ	Значения для ЦМА-15		
		Контрольный	С капсулированным модификатором	
			Масло	AR-полимер
Критерий прочности при температуре 20 °С	$k_{R20}$	1,00	0,93	1,20
Критерий прочности при температуре 50 °С	$k_{R50}$	1,00	0,64	1,09
Критерий трещиностойкости при температуре 0 °С	$k_{тр}$	1,00	0,85	1,19
Критерий водонасыщения	$k_W$	1,00	1,58	1,46
Критерий водостойкости	$k_B$	1,00	0,97	0,98
Критерий сдвиговой устойчивости	$k_{СДВ}$	1,00	0,87	1,15

С использованием формул  $K_{ФМ} = \sqrt[3]{k_{R20}k_{R50}k_{тр}}$ ,  $K_{ЭК} = \sqrt[3]{k_Wk_Bk_{СДВ}}$  и  $K_{СВ} = \sqrt[3]{k_{SH}k_Vk_D}$  с учетом значений коэффициентов весомостей были рассчитаны значения обобщенного критерия качества для разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным AR-полимером (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Значения обобщенного критерия качества

Наименование показателей	Коэффициенты весомости			Критерии качества			
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$K_{ФМ}$	$K_{ЭК}$	$K_{СВ}$	$F_k$
Вариант 1	0,2	0,4	0,4	0,23	0,41	0,72	1,36
Вариант 2	0,33	0,33	0,34	0,38	0,34	0,61	1,33
Вариант 3	0,2	0,5	0,3	0,23	0,52	0,54	1,29

Для расчета использовались три вариант предпочтения свойств у разрабатываемого материала, в соответствии с чем отличались коэффициенты весомости. Коэффициенты весомости для варианта 1 обусловлены предпочтением в область эксплуатационных и самовосстанавливающихся свойств. Обобщенный критерий качества в таком случае отражает эффективность разрабатываемого асфальтобетона по сравнению с традиционным на 36 %. Для варианта 2 с равнозначной ценностью всех групп показателей качества эффективность на 33 % больше. А в случае предпочтения эксплуатационным свойствам асфальтобетона (вариант 3) эффективность так же превышает традиционный ЦМА-15 на 29 %.

Результаты расчета эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с применением капсулированного AR-полимера, состав которого представлены таблице 4.11, свидетельствуют о его большей технической эффективности на 33 % по сравнению с традиционным ЦМА-15.

Таблица 4.11 – Состав разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором

Компоненты смеси	Расход компонента на 1 тонну, кг	Содержание компонента, %
Щебень габбро-диабазовый фракции 5...20 мм	603,2	60,32
Отсев камнедробления гранита	185,6	18,56
Минеральный порошок МП-1	139,2	13,92
Битум БНД 60/90	65,0	6,5
Стабилизирующая добавка Viator-66	2,8	0,28
Капсулированный полимерный модификатор	1,9	0,19
Компонент Б – активатор	2,3	0,23

Таким образом, полученные результаты исследования физико-механических, эксплуатационных свойств и свойств, характеризующих процесс самовосстановления, доказывают возможность получения щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-15 с использованием капсулированного AR-полимера в комплексе с активатором, который отвечает требованиям нормативных документов в соответствии с ГОСТ 31015 и обладающего способностью самовосстановления.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения асфальтобетона смеси, после приготовления и уплотнения которой, капсулы с модификатором остаются целостными, а в период формирования напряжений в структуре и образования дефектов способны разрушаться для высвобождения капсулированного модификатора.

2. Возможность создания капсул, содержащих модификатор для самовосстанавливающихся асфальтобетонов, обосновывается значительным отличием напряженных состояний в материале при воздействии нагрузок, возникающих на технологическом этапе в процессе приготовления асфальтобетонной смеси или ее уплотнении и в период эксплуатации асфальтобетона в дорожном покрытии. В асфальтобетонной смеси величина напряжений определяется дисперсностью минеральной части и геометрическими характеристиками капсул. В асфальтобетоне целостность капсул определяется способностью сопротивляться напряжениям, возникающим в композите, и зависит как от величины внутренних напряжений, которые увеличиваются в процессе эксплуатации, так и от геометрических характеристик капсул.

3. Основные свойства асфальтобетонов, модифицированных капсулированными восстановителями, следует, что введение капсул незначительно влияет на объемные свойства асфальтобетона, в некоторой степени снижаются физико-механические показатели, что связано с наличием элементов, капсул, в структуре с невысокой собственной прочностью. При некотором снижении показателей физико-механических свойств асфальтобетоны отвечают требованиям нормативных документов

4. При оптимальном содержании капсул с органическим восстановителем коэффициент восстановления показывает, что при повторном сжатии общие потери прочности с учетом действия модификатора оказались меньше на 28 %. Для асфальтобетона с оптимальным содержанием капсулированного модификатора на основе AR-полимера коэффициент восстановления отражает, что на

общие потери прочности с учетом действия модификатора на 46 % меньше. При этом эффективность восстановления с применением капсулированного модификатора на основе AR-полимера в 1,87 раза больше чем при использовании капсулированного модификатора на основе органического восстановителя.

5. Разработаны составы самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором, обладающего следующими свойствами: остаточная пористость – 1,8 %; водонасыщение – 1,3 %; предел прочности при расколе при 0 °С – 3,1 МПа; предел прочности при сжатии при 20°С – 3,6 МПа; предел прочности при сжатии при 50°С – 1,2 МПа; коэффициент внутреннего трения – 0,93; сцепление при сдвиге – 0,44; коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении по ГОСТ 12801-98 – 0,90; коэффициент самовосстановления – 1,93; коэффициент скорости самовосстановления – 1,76; коэффициент выхода из строя – 1,70.

6. Результаты определения коэффициента самовосстановления, отражающего интенсивность самовосстановления, коэффициента выхода из строя, отражающего стойкость структуры материала после восстановления, и скорости самовосстановления показывает, что в сравнении с традиционными ЩМА-15, асфальтобетон с капсулированным модификатором обладает большими значениями указанных показателей. Коэффициент самовосстановления ЩМА с капсулированным AR-полимером на 37 % больше чем для ЩМА с капсулированным маслом и на 93 % больше чем для традиционного ЩМА-15. При схожей скорости процесса самовосстановления капсулированный AR-полимер также позволяет получать более стойкую структуру асфальтобетона после самовосстановления на 62 %, чем капсулированное масло и на 70 % больше чем у традиционного ЩМА-15.

7. Расчет эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с применением капсулированного AR-полимера свидетельствуют о его большей технической эффективности на 33 % по сравнению с традиционным ЩМА-15.



## ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА

### 5.1 Принципиальная технологическая схема производства капсулированного модификатора

Технологический процесс производства капсулированного модификатора для самовосстанавливающихся асфальтобетонов представляет собой поточную технологию. Сырье для производства капсулированного модификатора с предприятий производителей осуществляется автотранспортом. Жидкие компоненты для производства модификатора доставляются автоцистернами и на производстве хранятся в закрытых стальных емкостях. Разгрузка сырья осуществляется с применением кран-балки, а перемещение по складу, производственному цеху, для растаривания из бигбегов может быть использована электролебедка. Для хранения сырьевых материалов на производстве предусматривается отдельное помещение от основного производственного цеха.

Принципиальная технологическая схема производства капсулированного модификатора для самовосстанавливающихся асфальтобетонов представлена на рисунке 5.1.

Для приготовления на различных этапах производства альгинатного раствора и альгинатной эмульсии осуществляется с применением высокоскоростных смесителей. Деление приготовленной эмульсии на отдельные капли осуществляется с использованием инкапсулятора. А их закрепление в растворе  $\text{CaCl}_2$  производится в промышленных ваннах с постоянным осевым течением.

Обезвоживание кальций-альгинатных капсул осуществляется с применением L-образного конвейер-обезвоживателя, после чего капсулы подвергаются сушке в сушильном барабане.

Упаковка капсулированного модификатора осуществляется с помощью дозаторов в пластиковые ведра с крышкой объемом от 3 до 12 литров.

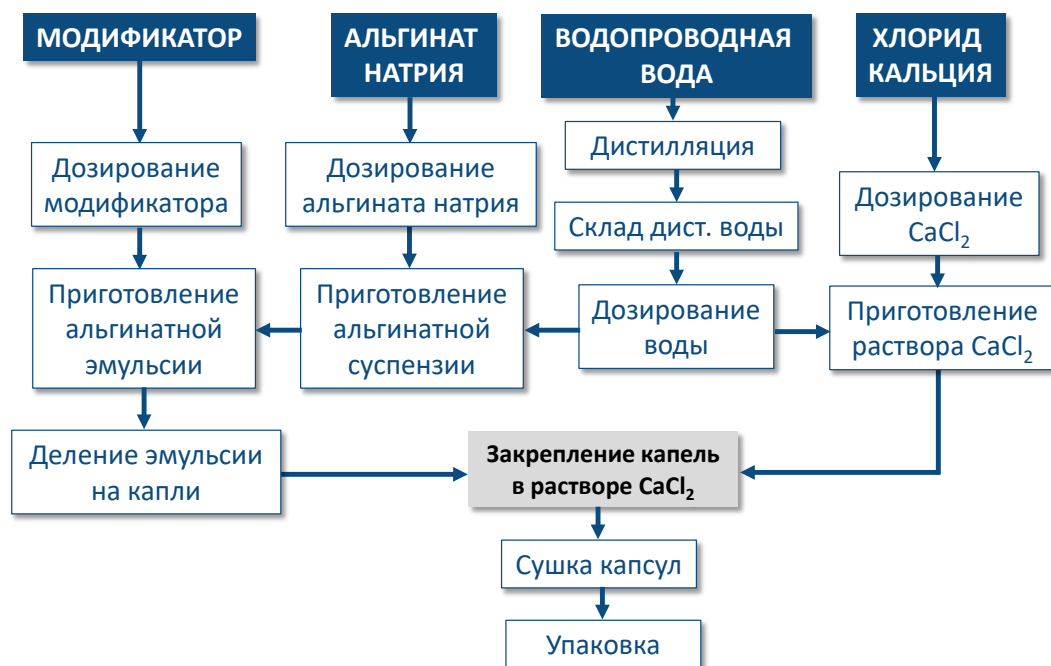


Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства капсулированного модификатора

## 5.2 Принципиальная технологическая схема производства смеси самовосстанавливающегося асфальтобетона

Производство щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением капсулированного модификатора может осуществляться на традиционном асфальтобетонном заводе (АБЗ). Однако для избегания термической деструкции капсулированного модификатора в процессе приготовления смеси технологический процесс получения ЩМА должен осуществляться при температуре не выше 150 °С. Для модифицирования битума добавками на производственной линии должен быть предусмотрен узел предварительного приготовления модифицированного вяжущего вещества. Технологический процесс производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением капсулированного модификатора включает в себя несколько этапов, состоящий из следующих процедур (рисунок 5.2):

1. Подготовка крупного заполнителя (щебень), мелкого заполнителя (песок из отсева камнедробления) и наполнителя (минеральный порошок): подача и предварительное дозирование, сушка и нагрев до температуры 145...150 °С;

2. Дозирование минеральных материалов, стабилизирующей добавки и капсул с модификатором в асфальтобетоносмесительную установку и их перемешивание

3. Подготовка битума (разогрев, обезвоживание, нагрев до рабочей температуры 145...150 °С, дозирование, подача в смеситель);

4. Дозирование добавок в смеситель для приготовления модифицированного вяжущего;

5. Приготовление модифицированного битумного вяжущего и дозирование в асфальтобетоносмесительную установку;

6. Смешивание всех компонентов в асфальтобетоносмесительной установке;

7. Отгрузка готовых щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением капсулированного модификатора.

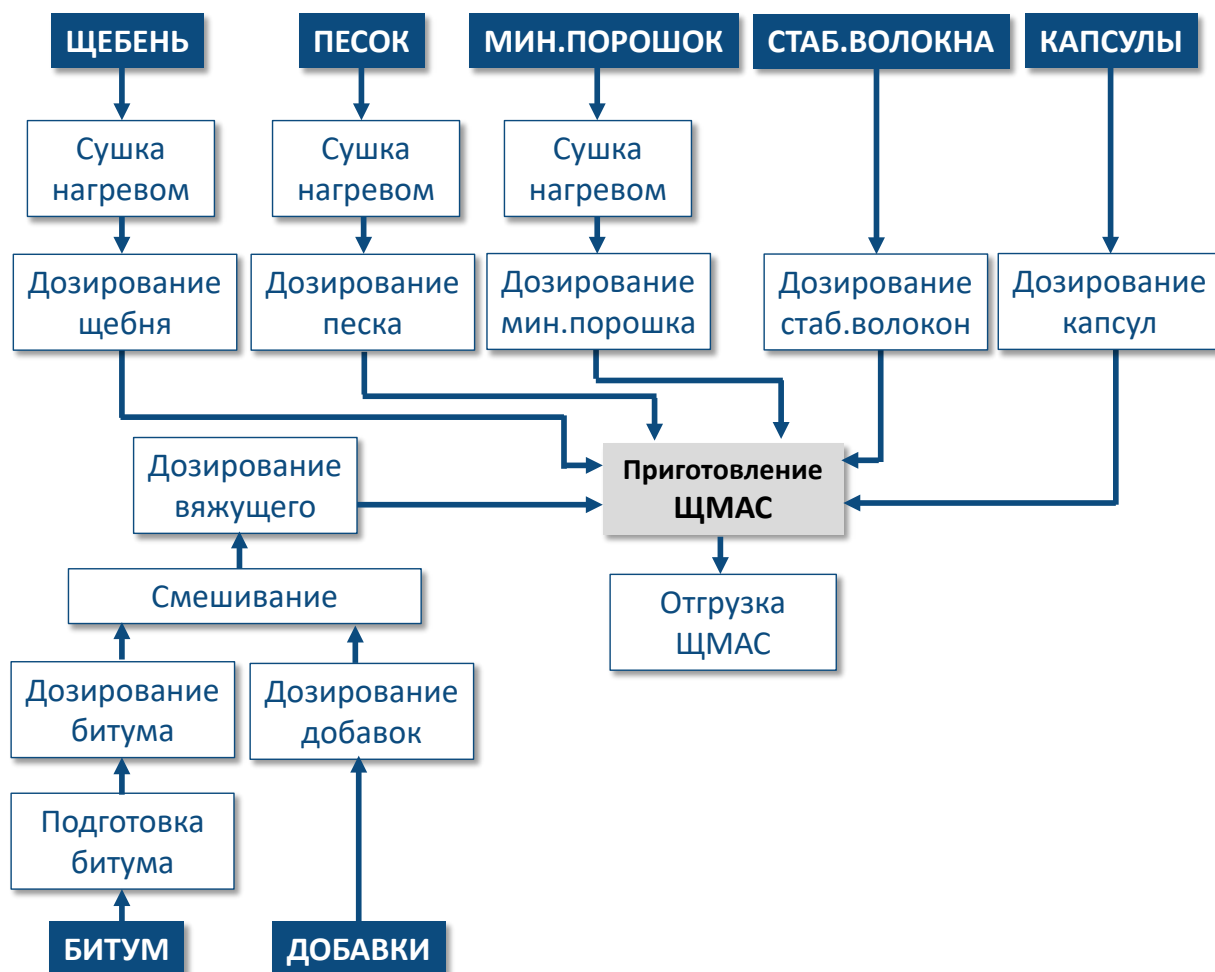


Рисунок 5.2 – Технологическая схема производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением капсулированного модификатора

Используемые компоненты должны соответствовать требованиям нормативных документов: щебень из плотных горных пород должен соответствовать ГОСТ 8267 (ГОСТ 32703), песок из отсевов дробления – ГОСТ 8736 (ГОСТ 32730), минеральный порошок – ГОСТ 16557 (ГОСТ 32761), битум нефтяной дорожный вязкий – ГОСТ 22245. Соответствие нормам оценивается в лаборатории АБЗ.

Производство щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением капсулированного модификатора возможно реализовать на базе завода «ТензоТехСервис» (таблица 5.1). Разработанная схема представлена на рисунке 5.3.

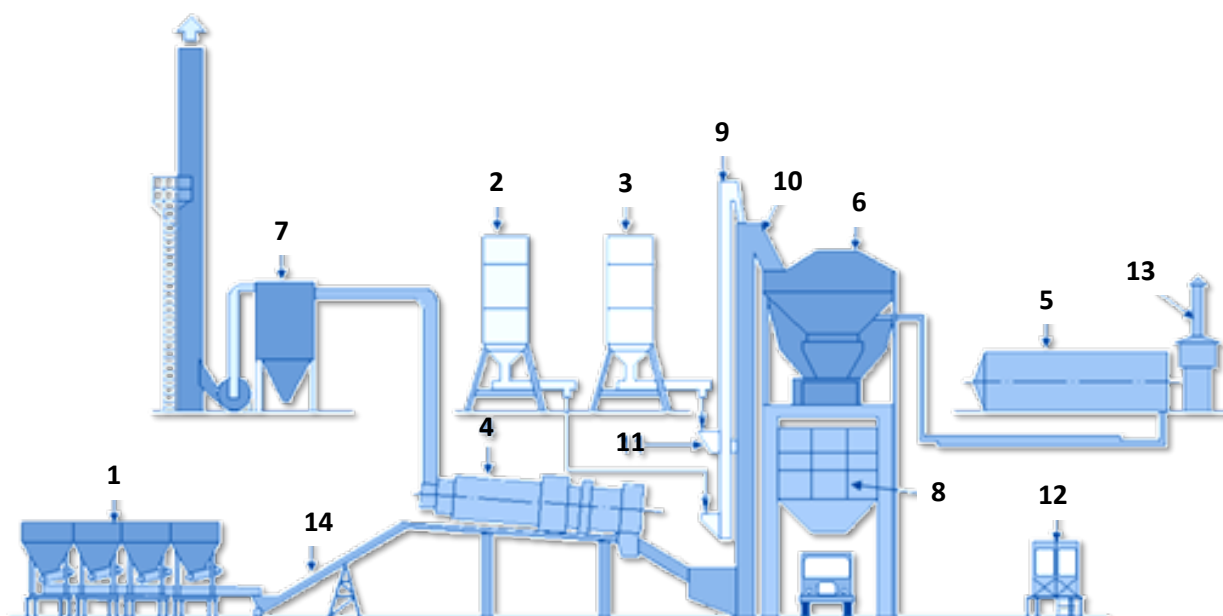


Рисунок 5.3 – Схема асфальтобетонного завода «ТензоТехСервис»

для производства самовосстанавливающегося асфальтобетона:

- 1 – бункеры-преддозаторы щебня и песка; 2 – силос минерального порошка; 3 – бункер капсулированного модификатора; 4 – сушильный барабан; 5 – бак-цистерна битумного вяжущего; 6 – смесительная установка; 7 – вихревой и циклонный пылеуловитель; 8 – накопительный бункер; 9 – элеватор минерального порошка; 10 – элеватор горячего материала; 11 – элеватор капсулированного модификатора; 12 – кабина оператора; 13 – нагреватель масла; 14 – элеватор сушильного барабана

Таблица 5.1 – Технологический процесс приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с применением капсулированного модификатора

№	Технологическая операция	Описание
1	2	3
1	Подача щебня и песка со склада	С использование фронтального погрузчика щебень и песок со склада загружается в бункеры-преддозаторы. Дозировщик и оператор погрузчика контролируют степень загрузки бункеров и наличие посторонних загрязнений в материале
2	Предварительное дозирование щебня и песка	Щебень и песок в естественном состоянии (с естественной влажностью) после предварительного дозирования отгружаются по ленточному транспортеру на сборный ленточный конвейер, который перемещает материалы в сушильный барабан
3	Сушка и нагрев щебня и песка	Щебень и песок в сушильном барабане подвергаются сушке и нагреву до температуры приготовления асфальтобетонной смеси. Осуществляется удаление влаги из минеральных компонентов при непрерывном перемешивании и их перемещении вдоль оси барабана. С помощью встроенных термодатчиков контролируется температура минеральных компонентов, которая не должна превышать температуру 150 °С. Регулировка температуры нагрева осуществляется с помощью автоматического контролера, задающего интенсивность работы горелки печи. Контроль за температурой осуществляется с пульта управления оператором.

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3
4	Система очистки	Для очистки от пыли отходящих газов предусмотрен сепаратор, соединенный к сушильному барабану, который осаждаёт крупные частицы пыли. Система очистки включает в себя несколько поэтапных фильтров, которые задерживают пыль с дальнейшим ее складированием в пыльном силосе. Контроль работы очистки осуществляется автоматизированной системой, которая в случае неисправности сообщает сигнал на пульт управления сушильным барабаном.
5	Сепарация нагретых минеральных материалов	После сушки и нагрева щебень и песок с помощью горячего элеватора транспортируется из сушильного барабана на систему грохотов для сепарации на отдельные фракции. Каждая фракция отправляется в соответствующий отсек горячего бункера. Негабаритные зерна материалов (более 40 мм) сепарируются в отдельный бункер для исключения их из технологического процесса приготовления смеси. Для контроля заполнения бункеров и температуры используются датчики контроля верхнего и нижнего уровня, термодатчики, которые выводят показания на пульт управления.
6	Смешивание минеральных компонентов и капсулированного модификатора	Сепарированный на фракции минеральные компоненты из горячего бункера, а также минеральный порошок, стабилизирующая добавка и капсулированный модификатор дозируются в смесительную установку. Контроль за количеством компонентов в смесителе осуществляется оператором с учетом рецептуры с использованием тензометрические дозаторы. Осуществляется смешивание всех компонентов в смесителе.

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3
7	Подготовка битумного вяжущего	Разогретое битумное вяжущее из бака-цистерны по трубопроводу транспортируется в смеситель через тензометрический дозатор. С помощью блока контроля температуры вяжущего осуществляется обеспечение необходимой температуры битумного вяжущего (не более 150 °С).
8	Приготовление асфальтобетонной смеси	С помощью смесителя принудительного действия осуществляется смешивание всех компонентов до однородного состояния. Готовая асфальтобетонная смесь с капсулированным модификатором через бункер-накопитель отгружается в автосамосвалы. Контроль за однородностью смеси осуществляется оператором визуально, а соответствие получаемого асфальтобетона по контрольным лабораторным испытаниям образцов, изготовленных из смеси.

### 5.3 Технико-экономическая эффективность

Экономическая эффективность использования самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором складывается из следующих преимуществ:

- снижение эксплуатационных затрат на содержание покрытий автомобильных дорог, построенных из самовосстанавливающегося асфальтобетона;
- продление периода безремонтной эксплуатации покрытий автомобильных дорог, построенных из самовосстанавливающегося асфальтобетона.

Оценка технико-экономической эффективности применения самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором проводилась по критерию, описанному в [203...205]:



$$k_{ef} = \left| \frac{\delta F}{\delta C} \right|, \quad (5.1)$$

где  $\delta F$  – относительное изменение обобщенного критерия качества:

$$\delta F = \frac{F_{SH} - F_t}{F_t}, \quad (5.2)$$

здесь  $F_t$  и  $F_{SH}$  – обобщенный критерий качества традиционного асфальтобетона и самовосстанавливающегося асфальтобетона, соответственно;

$\delta C$  – относительное изменение стоимости материала:

$$\delta C = \frac{C_{SH} - C_t}{C_t}, \quad (5.3)$$

где  $C_t$  и  $C_{SH}$  – цена за единицу традиционного асфальтобетона и самовосстанавливающегося асфальтобетона, соответственно.

Обобщенный критерий качества самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором рассчитывается по формуле (см. главу 2):

$$F_k = \alpha_1 K_{\Phi M} + \alpha_2 K_{ЭК} + \alpha_3 K_{СВ}, \quad (5.4)$$

где  $K_{\Phi M} = \sqrt[3]{k_{R20} k_{R50} k_{тр}}$  – мультипликативная функция (коэффициент), характеризующая физико-механические свойства (предел прочности при сжатии при 20 и 50 °С, предел прочности на растяжение при расколе при 0 °С);  $K_{ЭК} = \sqrt[3]{k_W k_B k_{СДВ}}$  – мультипликативная функция (коэффициент), характеризующая эксплуатационные свойства (водонасыщение, водостойкость, коэффициент внутреннего трения, показатель сцепления при сдвиге при 50 °С);  $K_{СВ} = \sqrt[3]{k_{SH} k_V k_D}$  – мультипликативная функция (коэффициент), характеризующая самовосстанавливающие свойства (интенсивность самовосстановления, ско-

рость самовосстановления и показатель выхода из строя);  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  – коэффициенты весомости.

Поскольку целевыми показателями качества самовосстанавливающегося асфальтобетона являются параметры, отражающие его способность самостоятельного восстановления, и обязательным условием является соответствие требованиям нормативных документов, то для расчета технико-экономической эффективности принят вариант с равной ценностью выделенных групп показателей, соответственно  $\alpha_1 = 0,33$ ,  $\alpha_2 = 0,33$  и  $\alpha_3 = 0,34$ . С учетом принятых коэффициентов весомости обобщенного критерия качества для разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором  $F_k = 1,33$  (глава 4, раздел 4.13, таблица 4.10).

Расчет цены самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором представлен в таблице 5.2. В расчете энергозатраты на производства разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона и традиционного асфальтобетона приняты равными.

Таблица 5.2 – Стоимости традиционного асфальтобетона и самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором

Компонент	Цена,	Асфальтобетон		Самовосстанавливающийся асфальтобетон	
		Расход на 1 тонну	Стоимость	Расход на 1 тонну	Стоимость
	руб./кг	кг	руб.	кг	руб.
1	2	3	4	5	6
Щебень	3,9	603,2	2352,5	603,2	2352,5
Отсев	4,0	185,6	742,4	185,6	742,4
Мин.порошок	5,3	139,2	737,8	139,2	737,8
Битум	18,0	65,0	1169,3	65,0	1169,3
Стабилизатор	30,0	2,8	83,5	2,8	83,5

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4	5	6
Капсулы с AR-полимером	400,0	–	–	1,9	779,5
Компонент Б	100,0	–	–	2,3	230,6
ИТОГО		1000,0	5085,4	1000,0	6095,6

Результаты расчета показывают, что стоимость разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором превышает стоимости традиционного щебеночно-мастичного асфальтобетона на 20 %. С учетом обобщенного критерия качества технико-экономическая эффективность разработанного материала равна:

$$k_{ef} = \left| \frac{\delta F}{\delta C} \right| = \frac{0,33}{0,20} = 1,68$$

Таким образом, результаты расчета подтверждают технико-экономическую эффективность разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором.

#### **5.4 Промышленное внедрение самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором**

По результатам экспериментальных исследований выполнена производственная апробация разработанных составов щебеночно-мастичного асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором. Компания АО «Лизен» (Вьетнам) использовала смесь асфальтобетона с капсулированным модификатором при ремонтно-восстановительных работах покрытия дороги на экспериментальном участке дороги в районе Тьен Йен, Куангнинь (Вьетнам). Основными материалами для приготовления асфальтобетона использовались вяжущее вещество, минеральные материалы, целлюлозные волокна, активатор и

капсулированный модификатор. Для обеспечения необходимого зернового состава асфальтобетона для получения ЩМА-15 минеральные компоненты смешивались в следующем соотношения: крупный заполнитель - 67 %; мелкий заполнитель - 21 %; наполнитель - 12 %.

Капсулы с модификатором были предоставлены автором диссертации. В качестве модификаторов использовались тиолсодержащий уретановый полимер «AR-полимер», произведенный ООО «ПолиМикс Казань» (Россия) в соответствии с ТУ 2226-001-90014974-11.

Процесс подбора, испытаний, оценки и последовательности приготовления асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором осуществлялось при контроле качества персонала предприятия в соответствии с технологическими процедурами, отраженными в диссертации, предоставленной автором.

При укладке экспериментальной смеси применялись машины и механизмы, что и при укладке традиционных смесей. Толщина укладываемого слоя асфальтобетонной смеси составила 5 см. Температура смеси при укладке в покрытие равнялась 140...145 °С.

Оценка основных свойств асфальтобетона осуществлялась в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний». Основные свойства асфальтобетона капсулированными модификатором представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Основные свойства асфальтобетона, изготовленных из смеси и кернов

Наименование показателя	Ед. изм.	Требования ГОСТ 31015	Результаты испытаний	
			Образцы-керны	Образцы из смеси
Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	–	2,43	2,43
Остаточная пористость, %	%	1,5...4,5	2,0	2,1
Водонасыщение, %	%	1,0...4,0	1,8	1,8
Сдвигоустойчивость:				
Коэффициент внутреннего трения	–	не менее 0,93	–	0,96
Сцепление при сдвиге при 50 °С	МПа	не менее 0,18	–	0,39
Предел прочности при расколе при 0 °С	МПа	2,5...6,0	–	2,6
Водостойкость (длительная)	–	не менее 0,85	–	0,88
Предел прочности при сжатии при 50 °С	МПа	не менее 0,65	–	1,3
Предел прочности при сжатии при 20 °С - $R_{20}$	МПа	не менее 2,2	–	3,5
Предел прочности при сжатии при 20 °С (повторно после 7 сут.) - $R_h$	МПа	–	–	3,3
Индекс самовосстановления $HI$	%	–	–	94

Компания АО «Лизен» отмечает высокие физико-механические параметры самовосстанавливающегося асфальтобетона с использованием капсул, осо-

бенно отмечается способность самовосстановления (Индекс самовосстановления  $HI = R_h/R_{20} \cdot 100 \% = 94 \%$ ).

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Разработана принципиальная технологическая схема производства капсулированного полимерного модификатора для самовосстанавливающегося асфальтобетона.

2. Разработана принципиальная технологическая схема производства самовосстанавливающегося асфальтобетона с использованием капсулированного полимерного модификатора.

3. Проведенный анализ технико-экономической эффективности показал, что самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным модификатором обеспечивает существенное увеличение критерия технико-экономической эффективности – на 68 % и, следовательно, к его обоснованному применению. Способность самовосстановления асфальтобетона позволяет увеличить межремонтные сроки.

4. Выполнена промышленная апробация разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором в компании АО «Лизен» при ремонтно-восстановительных работах покрытия дороги на экспериментальном участке дороги в районе Тьен Йен, Куангнинь Социалистической Республики Вьетнам из местных сырьевых ресурсов. Промышленные испытания показали высокие показатели физико-механических свойств материала и его способность к самовосстановлению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано научно обоснованное технологическое решение получения самовосстанавливающегося асфальтобетона, которое достигается использованием капсулированного полимерного модификатора в виде капсул-контейнеров, где располагается активный компонент, извлечение которого вследствие разрушения капсулы приводит к его полимеризации в объеме дефекта и восстановлению способности композита сопротивляться механическим нагрузкам. Доказана возможность получения асфальтобетона смеси, после приготовления и уплотнения которой, капсулы с модификатором остаются целостными, а в период формирования напряжений в структуре и образования дефектов способны разрушаться для высвобождения капсулированного модификатора.

2. Показано, что использование альгината натрия для капсулирования восстанавливающих агентов для самовосстановления асфальтобетонов, позволяет получать капсулы, способные выдержать температурное воздействие при приготовлении асфальтобетонной смеси и период ее уплотнения асфальтобетонной смеси без разрушения. Установлено, что свойства капсул не зависят от вида модификатора для самовосстановления, а максимальный объем модификатора, который могут содержать кальций альгинатные капсулы ограничивается  $83 \pm 1$  % от объема.

3. Разработаны составы капсулированного полимерного модификатора, обладающего следующими свойствами: средний диаметр – 1,35 мм; содержание модификатора – 83 %; прочность – 18 Н; термостойкость – до 150 °С

4. Установлены соотношения компонентов для получения альгинатных эмульсий, которые могут быть использованы при разработке композиций для капсулирования различных типов восстановителей. Диапазон можно рассчитать, изменяя соотношение ВА/А в зависимости от содержания альгината натрия, при котором достигается максимальная вязкость эмульсий:  $O/A = 26.734C_{at}^{-2.543}$ . Высокая устойчивость альгинатных эмульсий к расслоению



соответствует структурированной системе, начало разрушения которой определяется отношением  $BA/A$  и может быть описано зависимостью  $t_d = -0,5216 \cdot BA/A + 10,25$ . Структура устойчивых альгинатных эмульсий характеризуется средним размером частиц дисперсной фазы от 5 до 7 мкм, среднее расстояние между которыми составляет от 7 до 9 мкм.

5. Влияние температуры 140 °С на прочность капсул незначительно, а при 150 °С прочность снижается всего на 4 %. Изменения в структуре альгината кальция происходят при температуре выше 155 °С. Так, меньшее влияние на физико-механические свойства капсул оказывает температура, не превышающая 150 °С, что позволяет использовать капсулированный модификатор в составе асфальтобетона при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

6. Доказано, что асфальтобетон обладает собственным потенциалом к самовосстановлению, который зависит как от свойств битума в его составе. Доминирующее значение в вопросе самозалечивания битума среди мальтенов играют именно ароматические соединения. Это может быть связано с очередностью перехода в расплав отдельных фракций битума при повышении температуры: ароматические соединения, имея меньшую температуру размягчения, что обуславливает большее участие их молекул в свободном тепловом движении, чем молекул смол.

7. Разработаны составы самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором, обладающего следующими свойствами: остаточная пористость – 1,8 %; водонасыщение – 1,3 %; предел прочности при расколе при 0 °С – 3,1 МПа; предел прочности при сжатии при 20°С – 3,6 МПа; предел прочности при сжатии при 50°С – 1,2 МПа; коэффициент внутреннего трения – 0,93; сцепление при сдвиге – 0,44; коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении по ГОСТ 12801-98 – 0,90; коэффициент самовосстановления – 1,93; коэффициент скорости самовосстановления – 1,76; коэффициент выхода из строя – 1,70.

8. Результаты определения коэффициента самовосстановления, отражающего интенсивность самовосстановления, коэффициента выхода из строя, отражающего стойкость структуры материала после восстановления, и скорости самовосстановления показывает, что в сравнении с традиционными ЩМА-15, асфальтобетон с капсулированным модификатором обладает большими значениями указанных показателей. Коэффициент самовосстановления ЩМА с капсулированным AR-полимером на 37 % больше чем для ЩМА с капсулированным маслом и на 93 % больше чем для традиционного ЩМА-15. При схожей скорости процесса самовосстановления капсулированный AR-полимер также позволяет получать более стойкую структуру асфальтобетона после самовосстановления на 62 %, чем капсулированное масло и на 70 % больше чем у традиционного ЩМА-15.

9. Расчет эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с применением капсулированного AR-полимера свидетельствуют о его большей технической эффективности на 33 % по сравнению с традиционным ЩМА-15.

10. Разработана принципиальная технологическая схема производства капсулированного полимерного модификатора для самовосстанавливающегося асфальтобетона. Разработана принципиальная технологическая схема производства самовосстанавливающегося асфальтобетона с использованием капсулированного полимерного модификатора. Проведенный анализ технико-экономической эффективности показал, что самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным модификатором обеспечивает существенное увеличение критерия технико-экономической эффективности – на 68 % и, следовательно, к его обоснованному применению. Способность самовосстановления асфальтобетона позволяет увеличить межремонтные сроки.

Выполнена промышленная апробация разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором в компании АО «Лизен» при ремонтно-восстановительных работах покрытия до-

роги на экспериментальном участке дороги в районе Тьен Йен, Куангнинь Социалистической Республики Вьетнам из местных сырьевых ресурсов. Промышленные испытания показали высокие показатели физико-механических свойств материала и его способность к самовосстановлению.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в исследовании способности самовосстановления в условиях действия динамических механических нагрузок и/или погодно-климатических факторов. Поиск новых модификаторов для капсулирования, и способов синтеза капсулированных модификаторов, а также расширение методологических подходов для оценки свойств самовосстановления асфальтобетонов.

**ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АБЗ – асфальтобетонный завод

БНД – битум нефтяной дорожный

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия

МП – минеральный порошок

РФА – рентгенофазовый анализ

СВАБ – самовосстанавливающийся асфальтобетон

ТМТД – тетраметилтиурамдисульфид

ЩМА – щебеночно-мастичный асфальтобетон

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

капсулированный модификатор: Модификатор в виде капсулы-контейнера, содержащий вещество, восстанавливающий агент.

восстанавливающий агент: Вещество выступающее в качестве активного компонента в составе материала, вступающее во взаимодействие с компонентами структуры при высвобождении из капсул.

самовосстановление: Процесс управляемого восстановления состояния структуры материала без вмешательства извне, обеспечивающего продление его эксплуатационной пригодности.

самовосстановление: Восстановление объекта без вмешательства извне.

инкапсулирование (капсулирование): Технологический процесс получения материала, заключенного в капсулу с заданными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Рыбьев И.А. Асфальтовый бетон / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1969. 399 с.
2. Волков М.И. Дорожно-строительные материалы / М.И. Волков, И.М. Борщ, И.М. Грушко, И.В. Королев – М.: Транспорт, 1975. 528 с.
3. Котлярский Э.В. Роль битумоемкости в формировании структуры и свойств асфальтобетонных смесей. / Э.В. Котлярский // Сб. научных трудов. «Проблемы создания информационных технологий». – М.: Минск. 2006. С. 100-107.
4. Волков И.И., Дутова В.В. Битумоемкость минеральных порошков. В сб.: Труды Союздорнии, вып.46, М., 1970, с.194-201.
5. Волков М.И., Королев И.В. Структуробразование и взаимосвязь структур в асфальтобетоне. В сб.: Материалы работ симпозиума по структуре и структурообразованию в асфальтобетоне. -М.: 1968, с.38-47.
6. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Попов В.А. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 1. Теоретические основы. – Москва, Изд-во Российской инженерной академии, 2009. – 297 с.
7. Бунькин И.Ф., Воробьев В.А. Моделирование и оптимизация управления составом асфальтобетонных смесей / И. Ф. Бунькин, В. А. Воробьев В. А. М.: Российская инженерная академия, 2001. 328 с.
8. Гезенцевей Л.Б.у Слива ГЛ. Избирательная фильтрация битумов при взаимодействии с минеральными порошками. В сб.: Труды Союздорнии, вып.46 М.у 1970, с.98-107.
9. Гезенцевей Л.Б. Дорожный асфальтобетон. М. 1976 -335 с.
10. Гезенцевей Л.Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов. М.: Стройиздат,- 1971 - 255 с.
11. Горелышев Н.В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы / Н. В. Горелышев. -М.: Можайск-Тера, 1995.-176 с.

12. Горельшев Н.В. Оптимальная структура минерального состава асфальтобетона. В сб.: Материалы работ симпозиума по структуре и структурообразованию в асфальтобетоне. - Балашиха, Московской обл. 1968, с. 61-75.

13. Горельшев, Н. В. Принципы образования асфальтобетона [Текст] / Н. В. Горельшев // Тр. СоюздорНИИ. М. 1966. Вып. 7. 117 с.

14. Золотарев В.А. О некоторых задачах в области фундаментальных исследований дорожных бетонов на органических вяжущих / В.А. Золотарев // «Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов»: Тезисы докладов республиканской конференции – Харьков, 1989. С. 4-6.

15. Золотарев В.А. Сравнение показателей сдвигоустойчивости при кручении и колееобразовании / В.А. Золотарев, Д. Сибильски, С.А. Чугуенко // Вестник ХНАДУ. 2005. № 29. С. 255–258.

16. Иванов Н.Н. Строительство дорожных покрытий с применением битумов / Н.Н. Иванов, В.В. Михайлов. – М.:Росвузиздат, 1963. 43 с.

17. Иванов, Н. Н. Прочность и устойчивость покрытий из смесей каменных материалов с органическим вяжущим [Текст] / Н. Н. Иванов // Тр. МАДИ. – 1956. – Вып. 18. –С. 61–74.

18. Иванов, Н. Н. Устойчивость асфальтобетонных покрытий при высоких температурах [Текст] / Н. Н. Иванов // Повышение качества асфальтобетона: Тр. СоюздорНИИ. – М. 1975. Вып. 79. С. 21–25.

19. Королев И.В., Бутова В.В. Процессы структурообразования в битумах, наполненных минеральными порошками. В сб.: Труды Союздорнии, вып.46, 1970, с.161-168.

20. Королев И. В. Дорожный теплый асфальтобетон [Текст] / И. В. Королев. Киев : Высш. шк. 1975. 155 с.

21. Королев И.В. Модель строения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне [Текст] / И. В. Королев // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1981. № 8. С. 63–67.

22. Котлярский Э.В. Органические вяжущие: учебное пособие / Э.В. Котлярский, Т.Н. Акимова. М., 2012. 97 с.
23. Котлярский, Э.В. Строительно-технические свойства дорожного асфальтобетона. Учебное пособие / Э.В. Котлярский. – М.: Техполиграфцентр, 2004. 183 с.
24. Котлярский Э.В. О роли эксплуатационных воздействий в изменении параметров асфальтобетонного покрытия / Э.В. Котлярский, М.С. Кондратьев // Дорожная техника. 2010. С. 82.
25. Рыбьев И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ / И.А. Рыбьев. М.: Высшая школа, 1978. 309 с.
26. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение / И.А. Рыбьев. М.: Высш. школа, 2003. 701 с.
27. Рыбьев И. А. Дорожные битума и дегти [Текст] / И. А. Рыбьев. М. : Дориздат, 1952. –62 с.
28. Васильев Ю.Э., Илюхин А.В., Марсов В.И., Марсова Е.В. Инновационные технологии в производстве асфальтобетонных смесей. М.: МАДИ. 2016. 116 с.
29. Силкин В.В., Лупанов А.П., Васильев Ю.Э., Силкин А.В., Гладышев Н.В. Теплый асфальтобетон. СТТ: Строительная техника и технологии. 2013. № 5. С. 120.
30. Алехина М.Н., Васильев Ю.Э., Мотин Н.В., Сарычев И.Ю. Сероасфальтобетонные смеси. Строительные материалы. 2011. № 10. С. 12-13.
31. Ядыкина В.В., Лесовик Р.В., Гричаников В.А. Мелкозернистые дорожные бетоны с наполнителями из техногенного сырья КМА. Белгород, 2006. 123 с.
32. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Ветров М.В. К вопросу использования крупнотоннажных пылевидных отходов зоны КМА при производстве асфальтобетона. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2000. С. 623.



33. Колбановская, А.С. Дорожные битумы [Текст] / А.С. Колбановская, В.В. Михайлов. М.: Транспорт. 1973. 264с.
34. Борщ И.М. Минеральные порошки для асфальтобетонных материалов / И.М. Борщ, Л.С. Терлецкая // Дорожно-строительные материалы. – Харьков.: ХАДИ 1961, вып. 26 с. 10-28.
35. Иноземцев С.С., Поздняков М.К., Королев Е.В. Исследование адсорбционно-сольватного слоя битума на поверхности минерального порошка Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 159-167.
36. Колбановская А.С., Давыдова А.Р. ПАВ улучшают свойства битумо-минеральных смесей и повышают их долговечность. Автомобильные дороги. 1959. № 11. С. 15-16.
37. Braham A.F., Battler W., Ni F. Laboratory Mixed-Mode Cracking of Asphalt Concrete Using the Single-Edge Notch Beam // Road Materials and Pavement Design. 2010. № 4. Vol. 11. Pp. 947-968.
38. Soohyok I., Van H., Kim Y.R. Mode-Dependent Fracture Behavior of Asphalt Mixtures with Semicircular Bend Test // TRR. 2014. № 2447. Vol. 4. Pp. 23-30.
39. Mohammadreza S., Kim Y.R. Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures under Different Modes of Fatigue Loading // TRR. 2014. № 2447. Vol. 4. Pp. 117-125.
40. Dragon I. Influence of the Composition of the Asphalt Mixtures on their Fatigue Performance / 5th Euroasphalt & Eurobitume Congress. – 3-15th June 2012, Istanbul. – A5EE-222.
41. Majidzadeh K., Chan A.T., Ramsamooj D.V. Fatigue and Fracture of a Bituminous Paving Mixture // Highway Research Record. 1970. № 313. Pp. 44-54.
42. Бахрах Г.С. Эволюция методов оценки выносливости асфальтобетона // Дороги и мосты. 2017. № 2 (36). С. 18.
43. Ликомаскина М.А., Ерофеев В.Т. Оценка долговечности асфальтобетонных при испытаниях в климатических условиях с переменной влажностью,

ультрафиолетовым облучением и агрессивной морской водой // Вестник МГСУ. 2016. № 6. С. 74.

44. Гридчин А.М., Духовный Г.С., Котухов А.Н., Погромский А.С. Оценка воздействия климатических факторов на асфальтобетон // Вестник БГТУ им. Шухова. 2003. №5. С. 262–264.

45. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. "Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification", Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 147-157.

46. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Агрессивность эксплуатационных условий дорожно-климатических зон России. Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 3 (89). С. 22-26.

47. Кожевников Б.Л. Оценка изменений климата энтропийным информационно-статистическим методом // Метеорологический вестник. 2009. Т. 2. № 3. С. 140-148.

48. До Т.Ч., Иноземцев С.С. Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов. Вестник МГСУ. 2020. Т.15. В.10. С. 1407–1424.

49. До Т.Ч., Иноземцев С.С., Королев Е.В. Отечественный опыт исследования в области строительных материалов с функцией самовосстановления. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 99–105.

50. Bengisu M., Ferrara M. Materials that Move: Smart Materials, Intelligent Design. 2018. PoliMI SpringerBriefs. 139 p. DOI: doi.org/10.1007/978-3-319-76889-2\_5.

51. Shahinpoor M., Schneider H.-J. Intelligent Materials. 2007. 532 p. DOI: doi.org/10.1039/9781847558008.

52. Ghosh Swapan Kumar. Self-healing materials: fundamentals, design Strategies, and applications (1st ed.). Weinheim: Wiley. 2009. VCH. 307 p.

53. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1920. A 221. Pp. 163–198.

54. Королев Е.В., Баженов Ю.М. Альбакасов А.И. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Пенза, Оренбург: ИПК ОГУ. 2010. 364 с.
55. Schlangen E., Sangadji, S. Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms - Recent advances in self healing concrete and asphalt. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 54. Pp. 39-57.
56. Zhuang X., Zhou S. The prediction of self-healing capacity of bacteria-based concrete using machine learning approaches. 2019. *Computers, Materials and Continua*. Vol. 59 Issue 1. Pp. 57-77.
57. Wiktor V., Jonkers H.M. Bacteria-based concrete: From concept to market. *Smart Materials and Structures*. 2016. Vol. 25 Issue 8. 084006.
58. De Belie N., Wang J. Bacteria-based repair and self-healing of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2015. Vol. 5. Issue 1. Pp. 35-56.
59. Nallanathel M., Needhidasan S., Ananya M. Self healing concrete - Facts and potentials. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. Special Issue 33. Pp. 24243-24246.
60. Li W., Dong B., Yang Z., Xu J., Chen Q., Li H., Xing F., Jiang Z. Recent Advances in Intrinsic Self-Healing Cementitious Materials. *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30. Issue 17. 1705679.
61. Breugel K. Self healing concepts in Civil Engineering for sustainable solutions: Potential and constraints. *Proceedings of the Second International Conference on Self-healing Materials*, Berlin. 2009.
62. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Interaction process on the phases interface “bitumen – dispersed phase from cement stone”. *Magazine of Civil Engineering*. Vol. 82. Issue 6. Pp. 60-67.
63. Jonkers H.M. Self healing concrete: a biological approach. In *Self healing materials - An alternative approach to 20 centuries of materials science*. 2007. Pp. 195 –204.

64. Jonkers H.M., Schlange E. Development of a bacteria - based self healing concrete. In Tailor made concrete structures - new solutions for our society. Proc. Int. FIB symposium. 2008. Pp. 425 -430.

65. Jonkers H.M., Schlangen E. Bacteria-based self-healing concrete. International journal of restoration of buildings and monuments. 2009. Vol. 15. Issue 4. Pp. 255-265.

66. Jonkers H.M., Thijssen A., Muijzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological engineering. 2010. Vol. 36 Issue 2. Pp. 230-235.

67. Zemskov S., Jonkers H.M., Vermolen F.J. An analytical model for the probability characteristics of a crack hitting an encapsulated self-healing agent in concrete. In V.P. Gerdt, W. Koepf, E.W. Mayr & E.V. Vorozhtsov (Eds.), Computer Algebra in Scientific Computing. 2010. Vol. 6244. Pp. 280-292.

68. Jonkers H.M., Loosdrecht M. Biogeocivil engineering. Ecological engineering. 2010. Vol. 36 Issue 2. Pp. 97-98.

69. Zemskov S.V, Jonkers H.M., Vermolen F.J. Two analytical models for the probability characteristics of a crack hitting encapsulated particles: Application to self-healing materials, Journal of Computational Materials Science. 2011. Vol. 50. Pp. 3323-3333.

70. Srinivasa Reddy V., SeshagiriRao M.V., Sushma S. Feasibility Study on Bacterial Concrete as an innovative self crack healing system. International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. 2015. Vol. 2. Issue 7. Pp. 642-647.

71. Bansal S., Tamang R.K., Bansal P., Bhurtel P. Biological Methods to Achieve Self-healing in Concrete. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 38. Pp. 63-71.

72. Joshi K.A., Kumthekar M.B. and Ghodake V.P. Bacillus Subtilis Bacteria Impregnation in Concrete for Enhancement in Compressive Strength. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2016. Vol. 3 Issue 5. Pp. 1229–1234.

73. Sarkar B.C., Sarkar M. Genetically modified *Bacillus subtilis* bacterial strain for self-healing and sustainable green bio-concrete. *Green Chemistry*. 2015. Vol. 5. Issue 3. p. 4172.

74. Depaa RA. B. and Felix Kala T. Experimental Investigation of Self Healing Behavior of Concrete using Silica Fume and GGBFS as Mineral Admixtures. 2015. *Indian Journal of Science and Technology*. Vol. 8. Issue 36. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i36/87644.

75. Sakina Najmuddin Saifee, Divya Maheshbhai Lad, Jayesh Rameshbhai Juremalani. Critical appraisal on Bacterial Concrete. *IJRDO-Journal Of Mechanical And Civil Engineering*. 2015. Vol. 1. Issue 3. Pp. 10-14.

76. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G., Copuroglu O. Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36. Issue 2. Pp. 230-235.

77. Jonkers H.M., Schlangen E. Development of a bacteria-based self healing concrete. In *Tailor made concrete structures - new solutions for our society*. Proc. Int. FIB symposium. 2018. Pp. 425-430.

78. Wang J., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction Building Materials*. 2014. Vol. 68, Pp.110–119.

79. Feng X. Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules. *Proc. Int. Conf. on Durability of Concrete Structures*. 2008. Pp. 195-204.

80. Mihashi H., Kaneko Y., Nishiwaki T., Otsuka K. Fundamental Study on Development of Intelligent Concrete Characterized by Self-Healing Capability for Strength. *Trans. Japan Concrete. Inst.*.2000. Vol. 11. Issue 2. Pp. 21-28.

81. Van Tittelboom K., Wang J., Araújo M., Snoeck D., Gruyaert E., Debbaut B., Derluyn H., Cnudde V., Tsangouri E., Van Hemelrijck D., De Belie N. Compari-

son of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 107. Pp. 125–137.

82. Thao T. D. P., Johnson T. J. S., Tong Q. S., Dai P. S. Implementation of self-healing in concrete-proof of concept. *IES J.Part A: Civ. Struct. Eng.* Vol. 2. Issue 2. Pp. 116–125.

83. Han S., Choi E.K., Park W., Yi C., Chung N. Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete. *Applied Biological Chemistry.* 2019. Vol. 62. Issue 1. Pp. 19-24.

84. Иноземцев С.С., Гришина А.Н., Королев Е.В. Модель комплексного наноразмерного модификатора для асфальтобетонов. *Региональная архитектура и строительство.* 2013. № 3. С. 15-21.

85. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Техничко-экономическая эффективность применения наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона. *Вестник МГСУ.* 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 536-443.

86. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов. *Вестник МГСУ.* 2015. № 3. С. 29-39.

87. Высоцкая М.А., Власова Е.А., Кузнецов Д.А., Курлыкина А.В., Шеховцова С.Ю. Обзор состояния сегмента пропиточных материалов для покрытий автомобильных дорог *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова .* 2018. № 8. С. 6-12.

88. Меркулов В.В., Ибатов М.К., Измаилова Г.Г., Жаксыбаева Г.Ш., Мантлер С.Н. Применение модифицированной коксохимической смолы для обработки асфальтобетонных дорожных покрытий. *Современные наукоемкие технологии.* 2016. № 10 (2) С. 267-270.

89. Муса С.С., Рудакова В.В. Перспективы применения дорожных битумных эмульсий. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура.* № 3(5). 2015. С. 17-26.

90. Беляев Н.Н., Паневин Н.И. Новая роль пропиток. *Автомобильные дороги.* № 11. 2016. С. 82-86.

91. Шеховцова С.Ю., Королев Е.В. Обзор современного опыта использования реюнивателей для реверсинга асфальтобетонных покрытий Региональная архитектура и строительство. 2018. № 3 (36). С. 5-16.

92. Brownbridge J. The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation. Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation. Newport Beach CA, USA. 2010. Pp. 351-364.

93. Zaumanis M., Mallick R.B., Poulikakos L., Frank R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 71. Pp. 538-550.

94. P. Cong, J. Wang, K. Li, S. Chen Physical and rheological properties of asphalt binders containing various antiaging agents. Fuel. 2012. Vol. 97. Pp. 678-684.

95. Bergendahl J. Environmental Effects of Coal Tar-Based Pavement Rejuvenators. 2017. 76 p.

96. Zhang, Yu., Molenaar A.A., Shaopeng W. Assessment of effectiveness of rejuvenator on artificially aged porous asphalt concrete. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 110. Pp. 286-292.

97. Mazzonia G., Boccib E. Canestraria F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp. 157-168.

98. Xu G., Wang H., Sun W. Molecular dynamics study of rejuvenator effect on RAP binder: Diffusion behavior and molecular structure. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 158. Pp. 1046-1054.

99. Moghaddam T.B., Baaj H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 114. Pp. 805-816.

100. Ongel A., Hugener M. Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 94. Pp. 467-474.

101. Yu X.K., Zaumanisa M., Santos S.D., Poulikakos L.D. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*. 2014. Vol. 135. Pp. 162-171.
102. Shen J., Amirkhanian S., Miller J. A. Effect of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007 Vol. 19. Issue 5. Pp. 376-384.
103. Bhasin A., Palvadi S., Little D. Influence of Aging and Temperature on Intrinsic Healing of Asphalt Binders. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011. Vol. 2207. Issue 1. Pp. 70-78.
104. Tang J., Liu Q., Wu Sh., Ye Q., Sun Y., Schlangen E. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 113. Pp. 1029-1033.
105. Xie W., Castorena C., Wang Ch., Kim Y.R. A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 154. Pp. 771-779.
106. Amir Tabaković, Erik Schlangen. *Self-Healing Technology for Asphalt Pavements*. *Advances in Polymer Science book series*. 2015. Vol. 273. Pp. 285-306.
107. Fisher H. Self repairing materials – dream or reality? *Natural Science*. 2010. Vol. 2. No. 8. Pp. 873-901.
108. Qui J., M.F.C. van de Ven, Wu S., Molenaar A.A.A. Investigation of self healing capability of bituminous binders. *Road Materials Pavement Design*. 2009. Vol. 10. Issue 1. Pp. 81-94.
109. Phillips M.C. Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing. In: *Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders*, 1998, Luxembourg. Paper no. 115.
110. Liu Q, Schlangen E, van de Ven M., García A. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp.1207-1213.



111. Cordier P. et al. Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly. *Nature*. 2008. Vol. 451. Pp. 977-980.
112. Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., Van De Ven, M. Healing of porous asphalt concrete via induction heating. *Road Materials and Pavement Design*. 2010. Vol. 11. Pp. 527-542.
113. Liu Q., Schlangen E., Van De Ven M. Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 25. Pp. 880-885.
114. Xu Sh., García A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlangen E. Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced materials interface*. 2018. Vol. 5. Issue 17. 1800536.
115. Garcia A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*. 2012. Vol. 93. Pp. 264-272.
116. Sarsam S., Barakhas S.A. Influence of Load Repetitions and Heating on Micro Crack Healing of Asphalt Stabilized Subgrade Soil. *International Journal Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 1. Issue 3. Pp. 399-405.
117. Su J.F., Schlangen E., Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder technology*. 2004. Vol. 235. Pp. 563-571.
118. Su J.F., Wang Y.Y., Han N.X., Yang P., Han S. Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction Building Material*. 2016. Vol. 106. Pp. 317-329.
119. Raquel Casado Barrasaa, Víctor Blanco López, Carlos Martín-Portugués Montoliua, Verónica Contreras Ibáñezb, Josefina Pedrajasc, Julio Santarénd Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 162. Pp. 188–197.
120. Su J.F., Schlangen E. Synthesis and physicochemical properties of novel high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 198-199. Pp. 289-300.

121. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 135. Pp. 641–649.

122. Al-Mansooria T., Micaeloabc R., Artamendid I., Norambuena-Contrerasae J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 1091-1100.

123. Корячкина С.Я., Пригарина О.М. Научные основы производства продуктов питания: учебное пособие для высшего профессионального образования / Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет УНПК». 2011. 377 с.

124. Xua S., Tabaković A., Liua X., Schlangena E. Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 169. Pp. 379-387.

125. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Effect of capsule addition and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 2018. Pp. 51-53.

126. Prajer M., Wu X., Garcia S.J., Van der Zwaag S. Direct and indirect observation of multiple local healing events in successively loaded fibre reinforced polymer model composites using healing agent-filled compartmented fibres. *Composites Science and Technology. Interfaces*. 2014. Vol. 6. Issue 5. Pp. 3661–3670.

127. Tabakovic A., Dirk B, Van Gerwen M., Copuroglu O., Post W., Garcia S.J., Schlangen E. The compartmented alginate fibres optimisationfor bitumen rejuvenator encapsulation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2017. Vol. 4. Issue 4. Pp. 347-359.

128. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Micaelo R., Garciaa A. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 161. Pp. 330-339.

129. Jian Qiu , Shaopeng Wu, A. A. A. Molenaar Investigating the Self Healing Capability of Bituminous Binders. Road Materials and Pavement Design. 2009. Vol. 10. Pp. 81-94.

130. Norambuena-Contreras J., Liu Q., Zhang L., Wu S., Yalcin E., Garcia A. Influence of encapsulated sunflower. Materials and Structures. 2019. Vol. 52. Issue 4. 78.

131. Xu S., Tabaković A., Liu X., Palin D., Schlangen E. Optimization of the calcium alginate capsules for self-healing asphalt. Materials. 2019. Vol. 12. Issue. 1. 168.

132. Tabaković A., Schuyffel L., Karač A., Schlangen E. An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system. Applied Sciences. 2017. Vol. 7. Issue 7. 647.

133. Shu B., Bao S., Wu S., Dong L., Li C., Yang X., Norambuena-Contreras J., Liu Q., Wang Q. Synthesis and effect of encapsulating rejuvenator fiber on the performance of asphalt mixture. 2019. Materials. Vol. 12. Issue 8. 1266.

134. Inozemtcev S., Korolev E. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete. XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019) Electronic edition. Ser. "E3S Web of Conferences" 2019. P. 02007.

135. Евдокимов Ю.М. Адгезия. От макро- и микроуровня к наносистемам. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ. 2011. 208 с.

136. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1969. 320 с.

137. Дебройн Н., Гувинк Р. Адгезия. Клеи, цементы, припои. М., Издательство иностранной литературы. 1954. 600 с.

138. Бикерман Я.О. Новые представления о прочности адгезионных связей полимеров. Успехи химии. 1972. Т. 41. № 8. С.1431-1464.

139. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. Москва: Ростехиздат. 1960. 244 с.

140. Laurila T., Vuorinen V., Mattila T.T., Turunen M., Paulasto-Kröckel M., Kivilahti J.K. Interfacial Adhesion in Polymer Systems. Interfacial Compatibility in Microelectronics. 2012. Pp. 101-133.
141. Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. Москва: Лесная промышленность. 1964. 248 с.
142. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел, М., Наука. 1973. 278 с.
143. Королев Е.В., Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Самошин А.П., Иноземцев С.С. Обоснование выбора способа наномодифицирования асфальтобетонных смесей. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 40-43.
144. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt. MATEC Web of Conferences electronic collection. 2018. P. 01008.
145. Barrasa R.C., López V.B., Montoliu C.M.P., Ibáñez V.C., Pedrajasc J., Santaren J. Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2014. Vol. 162. Pp. 188-197. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.199.
146. Inozemtcev S., Korolev E. Surface modification of mineral filler using nanoparticles for asphalt application. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196(10). P. 04052. DOI: 10.1051/MATECCONF/201819604052.
147. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительнотехнологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. Киев: «Высшая школа», 1989. 326 с.
148. Налимов, В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голикова. М., Metallurgy, 1981. 150 с.
149. Shuang Cui, Bamber R.K., Blackman, Anthony J., Kinloch, Ambrose C., Taylor, Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2014. Vol. 54. 100-111.

150. Van Oort W.P. Durability of Asphalt - It's Aging in the Dark. *Ind. Eng. Chem.*, 1956. 48 (7). 1196–1201.
151. John O. Asphalt durability: from laboratory test to field implementation. *Fuel Science and Technology International*. 1992. Vol. 10. Issue 4-6. 501-518.
152. Shuanfa Chen, Bowen Guan, Rui Xiong, Yanping Sheng, Rui He, Durability of asphalt mixture in different corrosion solution. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2011. Vol. 26. Issue 6. 1200–1204.
153. Котлярский Э.В., Воейко О.А. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации. М., 2007г. 136 с.
154. Колбановская А.С. Структурообразование дорожных битумов. / А.С. Колбановская, А.Р. Давыдова, О.Ю. Сабсай. *Физико-химическая механика дисперсных структур*. М.:Наука, 1966. С.103-113.
155. Печеный Б.Г. Долговечность битумных и битумоминеральных покрытий. - М. : Стройиздат, 1981. 123 с.
156. Huachun Zhai, Delmar Salomon. Evaluation of Low-Temperature Properties and the Fragility of Asphalt Binders with Non-Arrhenius Viscosity-Temperature Dependence. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2005. 1901 (1). Pp. 44-51.
157. Higuera Sandoval C.H., Camargo Amaya X.V., Suárez Molano E.A. Effect of aging on the properties of asphalt and asphalt mixtures, *Ing. Univ.*, 2015. Vol. 19. no. 2. Pp. 335-349.
158. Feipeng Xiao, V.S. Punith, Serji N. Amirkhanian, Bradley J. Putmanb, Rheological and chemical characteristics of warm mix asphalt binders at intermediate and low performance temperatures. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2013. 40(9). Pp. 861-868.
159. Yongchun Cheng, Wensheng Wang, Guojin Tan, Chenglin Shi, Assessing High- and Low-Temperature Properties of Asphalt Pavements Incorporating Waste

Oil Shale as an Alternative Material in Jilin Province, China. *Sustainability*. 2018. 10. 2179.

160. Ruixia Li, Pravat Karki, Peiwen Hao, Amit Bhasin, Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 96. Pp. 47-54.

161. Королев Е.В., Смирнов В.А., Альбакасов А.И., Иноземцев А.С. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2011. Т. 3. № 6. С. 32-43.

162. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжанов Ю.В. Технические свойства полимерных материалов. Учеб.справ. пособие. СПб.: Профессия. 2005. 248 с.

163. Siti Nurjanah Ahmad, Tri Harianto, Lawalenna Samang and Muralia Hus-tim. Level vulnerability damage of pavement using Pavement Condition Index method. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 181. 11003.

164. Радовский Б.С. Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США URL: <http://stroit.ru/stati/problema-povysheniya-dolgovechnosti-dorozhnyh-odezhd-i-metody-ee-resheniya-v-ssha/>.

165. Inozemtcev S.S. Korolev E.V. Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp.147-157 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.147.

166. Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Системный анализ в строительном материаловедении - М: МГСУ, 2012. 432 с.

167. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир. 1985. 272 с.

168. Евстратова К.И., Купина Н.А., Малахова Е.Е. Физическая и коллоидная химия [Текст] /. М.: Высшая школа, 1990. 486 с.

169. Каргин В.А. Энциклопедия Полимеров. Т.1 А–К. Советская энциклопедия. 1972. 1224 с.

170. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология, Концепции, Методы, Приложения. СПб: Профессия. 2007. 560 с.
171. Щукин Е. Д. , Перцов А. В. , Амелина Е. А. Коллоидная химия: учебник для вузов. Москва: Издательство Юрайт. 2023. 444 с.
172. Урьев Н.Б. Физико-химическая динамика дисперсных систем и материалов – Долгопрудный, Издательский дом «Интеллект», 2013. 232 с
173. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Alginate emulsions for encapsulation of asphalt concrete modifiers: structural rheological properties. Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 101. Issue 1. 10104.
174. Yang, T.; Jia, Y.; Pan, Y.; Zhao, Y. Evaluation of the Low-Temperature Cracking Performance of Recycled Asphalt Mixture: A Development of Equivalent Fracture Temperature. Buildings. 2022. 12. 1366. <https://doi.org/10.3390/buildings12091366>.
175. Teltayeva, B.B.; Rossib, C.O.; Izmailovaa, G.G.; Amirbayeva, E.D.; Elshibayeva, A.O. Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt. Case Studies in Construction Materials. 2019. 11. e00238. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00238>.
176. Inozemtcev, S.; Korolev, E. Review of road materials self-healing: problems and perspective. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 855. 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/855/1/012010>.
177. Anupam, B.R.; Sahoo, U.C.; Chandrappa, A.K. A methodological review on self-healing asphalt pavements. Construction and Building Materials. 321. 2022. 126395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>.
178. Varma, R.; Balieu, R.; Kringos, N. A state-of-the-art review on self-healing in asphalt materials: Mechanical testing and analysis approaches. Construction and Building Materials. 310. 2021. 125197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125197>.
179. Nalbandian, K.M.; Carpio, M.; González, Á. Analysis of the scientific evolution of self-healing asphalt pavements: Toward sustainable road materials. Journal

of Cleaner Production. 2021. 293. 126107.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126107>.

180. Leegwater, G.; Taboković, A.; Baglieri, O.; Hammoum, F.; Baaj, H. Terms and Definitions on Crack-Healing and Restoration of Mechanical Properties in Bituminous Materials. Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. 2021. RILEM Bookseries 27. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_6).

181. Mouillet, V.; De la Roche, C.; Chailleux, E.; Coussot, P. Thixotropic Behavior of Paving-Grade Bitumens under Dynamic Shear. Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. 24(1). 23-31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000354](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000354).

182. Xua, S.; Liua, X.; Tabaković, A.; Lin, P.; Zhang, Y.; Nahar, S.; Lommerts, B.J.; Schlangena, E. The role of rejuvenators in embedded damage healing for asphalt pavement. Materials & Design. 2021. 202. 109564.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109564>.

183. Zheng, Y. Evaluation of sunflower oil's healing effect in bituminous materials. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*. 2019. 493. 012021.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/493/1/012021>.

184. Inozemtcev, S.; Korolev, E. Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. 1030. 012002.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012002>.

185. Inozemtcev, S.; Korolev, E. Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties. Magazine of Civil Engineering. 2021. 101(1). 10104. <https://doi.org/10.34910/MCE.101.4>.

186. Bueno, M.; Kakar, M.R.; Refaa, Z.; Wortlitschek, J.; Stamatiuo, A.; Partl, M.N. Modification of Asphalt Mixtures for Cold Regions Using Microencapsulated Phase Change Materials. Nature Research: Sci Rep. 2019. 9(1). 20342.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-56808-x>.



187. Bekele, A.; Ryden, N.; Gudmarsson, A.; Birgisson, B. Effect of Cyclic low temperature conditioning on Stiffness Modulus of Asphalt Concrete based on Non-contact Resonance testing method. *Construction and Building Materials*. 2019. 225. 502-509. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.194>.

188. Kim, Y.R.; Little, D.N.; Benson, F.C. Chemical and mechanical evaluation of healing mechanism of asphalt concrete. *Journal of Association Asphalt Paving Technologists*. 1990. 59. 240-275.

189. Little, D.N.; Lytton, R.L.; Williams, D.; Kim, R.Y. An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1999. 68. 501-542.

190. Sun, D.; Yu, F.; Li, L.; Lin, T.; Zhu, X.Y. Effect of chemical composition and structure of asphalt binders on self-healing. *Construction and Building Materials*. 2017. 133. 495–501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.082>.

191. Inozemtcev, S.; Jelagin, D.; Korolev, E.; Partl, M.N.; Fasil, H.; **Do, T.T.** Experimental and numerical study on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent. *Materials and Structures*. 2022. 55. 230. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02059-8>.

192. Иноземцев С.С., Королев Е.В., **До Т.Ч.** Самовосстановление асфальтобетона с использованием инкапсулированного модификатора // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 58–69.

193. Inozemtcev, S.S., **Do, T.T.** Sodium Alginate Application in Self-healing Technology for Asphalt Concrete // *Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, 160 LNCE. Pp. 59–65.

194. Inozemtcev, S., Korolev, E. **Trong, T.D.**, Thermal and Mechanical Properties of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt Concrete // *Materials Science*, 2021, 1041 MSF. страницы 101–106.

195. Inozemtcev, S.S., **Do, T.T.**, Korolev, E.V. Method for assessing the effect of self-healing of asphalt concrete with encapsulated modifier // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2124(1), 012006.

196. Inozemtcev, S.S., Korolev, E.V., Smirnov, V.A. Nanomodified bitumen composites: Solvation shells and rheology // Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering. 2016. Ch. 83. Pp. 393-397.

197. Riccardi C., Cannone Falchetto A., Losa M., Wistuba M. Modeling of the Rheological Properties of Asphalt Binder and Asphalt Mortar Containing Recycled Asphalt Material // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. Pp. 3503-3511.

198. Mirzanamadi Raheb, Johansson Pär, Grammatikos Sotirios A. Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 158. Pp. 774-785.

199. Daintith J.A. Dictionary of Physics (6 ed.). Oxford University Press. 2009. 624 p.

200. Окопный Ю.А. Механика материалов и конструкций. М. 2001. 409 с.

201. Королев Е.В., Гришина А.Н. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала. Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1 (42). С. 5-15.

202. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Влияние условий твердения и режима обработки в аппаратах вихревого слоя на свойства известково-песчаных изделий. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 7 (727). С. 5-15.

203. Королев Е.В. Техничко-экономическая эффективность и перспективные строительные материалы. Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С.9-14.

204. Баженов Ю.М., Королев Е.В. Техничко-экономические основы практической нанотехнологии в строительном материаловедении. Региональная архитектура и строительство. 2008. № 2. С.3-9.

205. Баженов Ю.М., Королев Е.В. Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении. Строительные материалы. 2009. № 6. С.66-67.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**

АО «ЛИЗЕН»

Адрес: район Бинь Тхань, город

Хошимин, Вьетнам.

ИНН: 0302310209

СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ

Независимость - Свобода - Счастье

**АКТ****О внедрении результатов диссертационной работы на тему  
«Самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным  
модификатором»**

Результаты диссертационной работы До Чонг Тоан на тему «Самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным модификатором» были использованы компанией АО «Лизен» (Вьетнам) при ремонтно-восстановительных работах покрытия дороги на экспериментальном участке дороги в районе Тьен Йен, Куангнинь (Вьетнам). Основными материалами для приготовления асфальтобетона использовались вяжущее вещество, минеральные материалы, функциональная добавка и капсулированный модификатор. Для обеспечения необходимого зернового состава асфальтобетона для получения ЩМА-15 минеральные компоненты смешивались в следующем соотношения: крупный заполнитель - 67 %; мелкий заполнитель - 21 %; наполнитель - 12 %.

Капсулы с модификатором были предоставлены автором диссертации. В качестве модификаторов использовались тиолсодержащий уретановый полимер «AR-полимер», произведенный ООО «ПолиМикс Казань» (Россия) в соответствии с ТУ 2226-001-90014974-11.

Процесс подбора, испытаний, оценки и последовательности приготовления асфальтобетона с капсулированным полимерным модификатором осуществлялось при контроле качества персонала предприятия в соответствии с технологическими процедурами, отраженными в диссертации, предоставленной автором.

При укладке экспериментальной смеси применялись машины и механизмы, что и при укладке традиционных смесей. Толщина укладываемого слоя асфальтобетонной смеси составила 5 см. Температура смеси при укладке в покрытие равнялась 140...145 °С.

Оценка основных свойств асфальтобетона осуществлялась в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного

строительства. Методы испытаний». Основные свойства асфальтобетона капсулированными модификатором представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные свойства асфальтобетонов

Наименование показателя	Ед. изм.	Требования ГОСТ 31015	Результаты испытаний	
			Образцы-керна	Образцы из смеси
Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	-	2,43	2,43
Остаточная пористость, %	%	1,5...4,5	2,0	2,1
Водонасыщение, %	%	1,0...4,0	1,8	1,8
Сдвигаустойчивость:				
Кoeffициент внутреннего трения	-	не менее 0,93	-	0,96
Сцепление при сдвиге при 50 °С	МПа	не менее 0,18	-	0,39
Предел прочности при расколе при 0 °С	МПа	2,5...6,0	-	2,6
Водостойкость (длительная)	-	не менее 0,85		0,88
Предел прочности при сжатии при 50 °С	МПа	не менее 0,65	-	
Предел прочности при сжатии при 20 °С - $R_{20}$	МПа	не менее 2,2	-	3,5
Предел прочности при сжатии при 20 °С (повторно после 7 сут.) - $R_t$	МПа	-	-	3,3
Индекс самовосстановления $HI$	%	-	-	94

Компания АО «Лизен» отмечает высокие физико-механические параметры самовосстанавливающегося асфальтобетона с использованием капсул, особенно отмечается способность самовосстановления (Индекс самовосстановления  $HI = R_t/R_{20} \cdot 100 \% = 94 \%$ ). Эти свойства согласуются с результатами, указанными в диссертационной работе До Чонг Тоан на тему «Самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным модификатором».

Хошимин, 19 июля 2023 г

Заместитель генерального директора акционерное общество «Лизен»

Адрес: 24А улица Фан Данг Лыу, 6 квартал, район Бинь Тхань, город Хошимин, Вьетнам.

Телефон: (+84)2838411375

E-mail: info@lizen.vn



..... Фи Нгок Ань