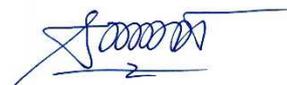


На правах рукописи



**До Чонг Тоан**

**САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЙСЯ АСФАЛЬТОБЕТОН С  
КАПСУЛИРОВАННЫМ ПОЛИМЕРНЫМ МОДИФИКАТОРОМ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

**Научный руководитель:**

**Иноземцев Сергей Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент

**Официальные**

**Васильев Юрий Эммануилович**

**оппоненты:**

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», кафедра «Дорожно-строительные материалы», заведующий кафедрой

**Абайдуллина Татьяна Николаевна**

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра «Строительные материалы», доцент

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Защита состоится «18» декабря 2023 года в 11:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.339.01



(подпись)

Иноземцев Александр Сергеевич

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 – восстанавливающего агента. 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 определенным требованиям, а общее количество активного компонента должно обеспечивать восстановление материала 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 прочности. Показано, что эффект самовосстановления 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 альгината 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 проч-

ности при сжатии при 20°C – 3,6 МПа; предел прочности при сжатии при 50°C – 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 диссертационной работы базируется на результатах отечественных и зарубежных исследователей в области строительного материаловедения, системного анализа, дорожных строительных материалов. Информационную базу составляют монографии, материалы научных мероприятий (конференций, симпозиумов), объекты интеллектуальной собственности, статьи в периодических российских и иностранных изданиях по сформулированной научной задаче. Диссертация выполнена с применением системно-структурного подхода строительного материаловедения. При проведении исследований использовались физические и химические методы определения свойств, методы регрессионного и корреляционного анализа и статистической обработки экспериментальных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование применения 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 основных 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 представле-

ния 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 работы.** 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.) и др.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируе-

мых научных изданий) и 4 статьи в иностранных журналах, индексируемых базой научного цитирования Scopus.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация 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.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**1. Закономерности синтеза и свойства капсулированного модификатора.** Для реализации технологии самовосстановления в асфальтобетоне необходим синтез капсулированного модификатора (капсулирование). Капсулирование осуществлялось с помощью альгинатной технологии, в которой натрий альгинатные капли эмульсии *восстанавливающего агента (ВА)* закрепляются в кальциевой соли. В качестве ВА рассматривались подсолнечное масло и тиолсодержащий уретановый AR-полимер (ООО «Полимикс-Казань»).

Эффективность действия ВА в асфальтобетоне зависит как от его химической природы, так и от степени его совместимости с битумным вяжущим. Параметр растворимости характеризуется интенсивностью межмолекулярного взаимодействия в веществе и равен энергии, затраченной отдалением молекул на расстояние, на котором силами взаимодействия можно пренебречь. Основные свойства и параметры растворимости, характеризующие способность образования гомогенной системы представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** 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

Показано, что AR-полимер, предлагаемый в качестве ВА, обладает лучшей способностью к образованию гомогенной системы с битумом, чем подсолнечное масло. Важным условием реализации синтеза капсул с восстанавливающим агентом при использовании *альгината натрия (А)* является способность образовывать технологические смеси в виде эмульсий.

Основным технологическим свойством, обеспечивающим формирование капсул с заданными размерами и толщиной стенки, по указанной технологии являются реологические свойства. Исследование вязкости, предела текучести и количества контактов частиц эмульсии с различным составом позволили установить рецептурную границу (рис. 1), которая может быть использована при проектировании составов для капсулирования различных типов восстанавли-

вающих агентов. Исследование кинетики изменения свойств эмульсий (рис. 2) позволило установить сроки технологической пригодности эмульсий.

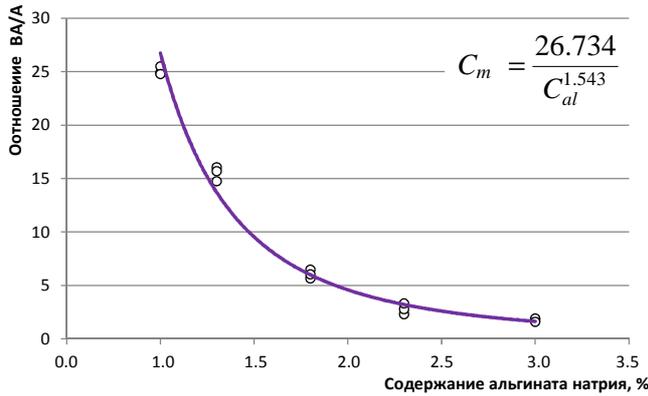


Рис. 1 – Изменение ВА/А от содержания альгината натрия для эмульсий с максимальной вязкостью, пределом текучести и количеством контактов

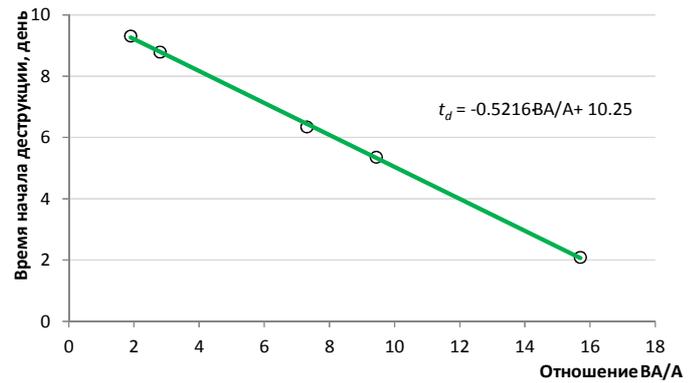
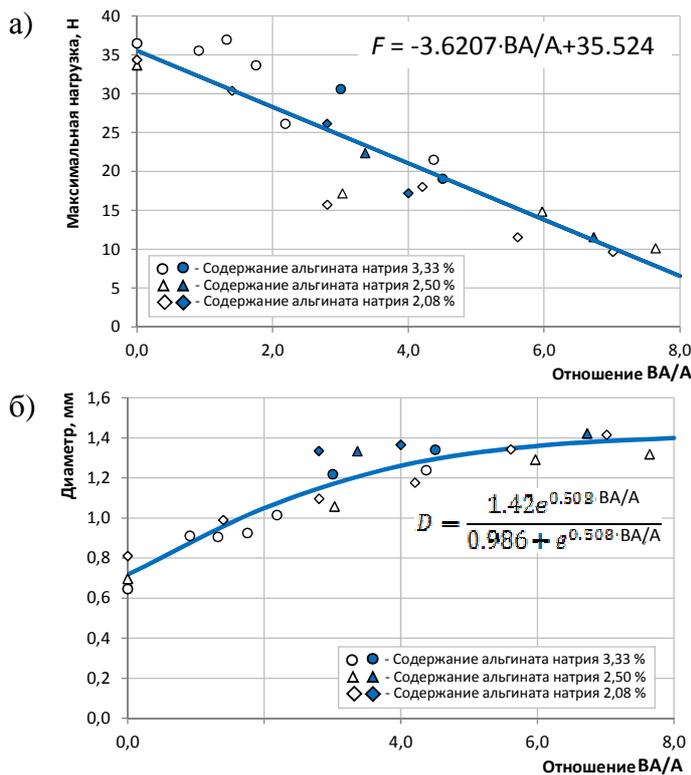


Рис. 2 – Зависимость времени начала деструкции эмульсии от ВА/А

Установлено, что 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. При этом для рассматриваемых эмульсий с содержанием альгината натрия 1,8...3,0 % контактирование между собой большей части дисперсной фазы происходит через 4...5 дней.

Эффективность капсул определяется и относительным объемом, который ВА занимает в капсуле, а также преимуществами обладают капсулы с меньшим диаметром, так как использование крупных капсул затрудняет равномерное их распределение в объеме материала (рис. 3).



Увеличение содержания ВА в составе альгинатной эмульсии приводит к закономерному снижению разрушающей нагрузки при сжатии. 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 модификатора не оказывают влияния на изменение механических свойств капсул.

Диаметр капсул и объем ВА в капсуле с увеличением его содержания в альгинатной эмульсии подчиняется экспоненциальной зависимости. Объем ВА в капсуле ограничива-

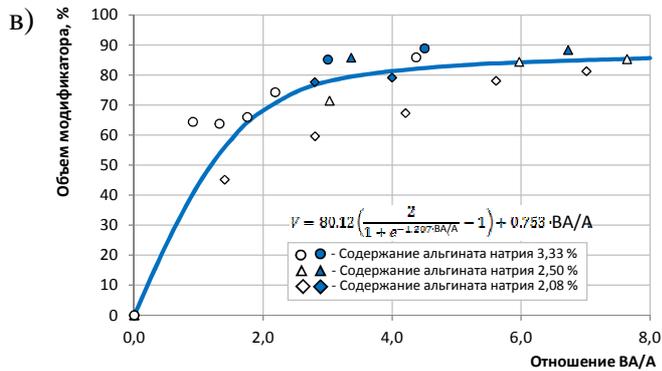


Рис. 3 – Изменение разрушающей нагрузки (а), диаметра (б) и объема ВА (в) в капсулах от соотношения модификатор/альгинат (белый маркер – AR-полимер; синий маркер – подсолнечное масло)

Реализации технологии включает подбор оптимального соотношения компонентов эмульсии для капсулирования с необходимой текучестью и стойкостью к расслоению, которые обеспечат максимальную скорость процесса производства капсул (рис. 4).

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 (рис. 5):

$$k_f = \sqrt[4]{k_F k_D k_V k_R} = \sqrt[4]{\frac{R_{RA}}{R_0} \cdot \frac{F_{RA}}{F_0} \cdot \frac{D_{RA}}{D_0} \cdot \frac{V_{RA}}{V_0}} \quad (1)$$

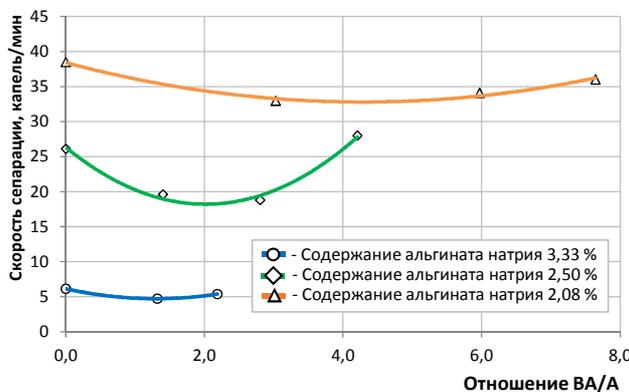


Рис. 4 – Изменение скорости сепарации эмульсии на капли альгинатной эмульсии с AR-полимером от ВА/А

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

В процессе производства асфальтобетонной смеси капсулированный модификатор подвергается воздействию температуры, что может привести к его преждевременному разрушению. Термостойкость капсулированного модификатора определялась показателям изменения массы и прочности капсул после термостатирования в течение 1; 2 и 4 часов при температуре

ется максимальным допустимым значением, которое может обеспечить альгинатная технология и составляет 83 %. Эффективность капсул с одинаковым объемом ВА и показателями прочностных характеристик определяется их меньшим диаметром.

Исходя из динамики изменения физико-механических свойств капсул, оптимизацию составов альгинатных эмульсий целесообразно проводить с учетом технологических свойств.

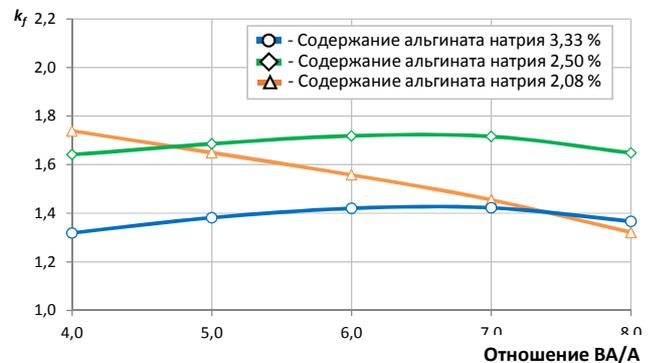


Рис. 5 – Зависимость критерия эффективности капсул от ВА/А

140; 150; 160 и 170 °С. Результаты определения влияния температуры на массу и разрушающую нагрузку капсул представлены на рис. 6 и рис.7.

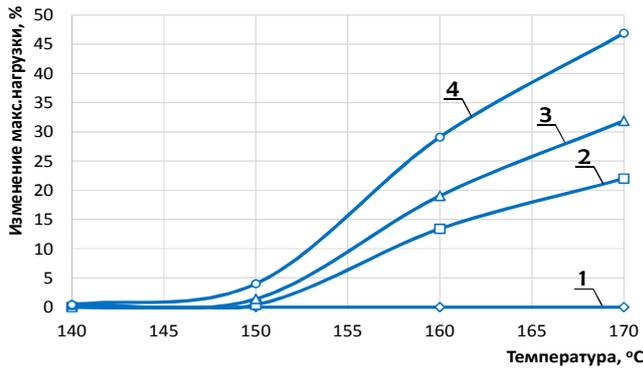


Рис. 6 – Изменение разрушающей нагрузки от температуры выдержки капсул: 1 – 0 ч; 2 – 1 ч; 3 – 2 ч; 4 – 4 ч.

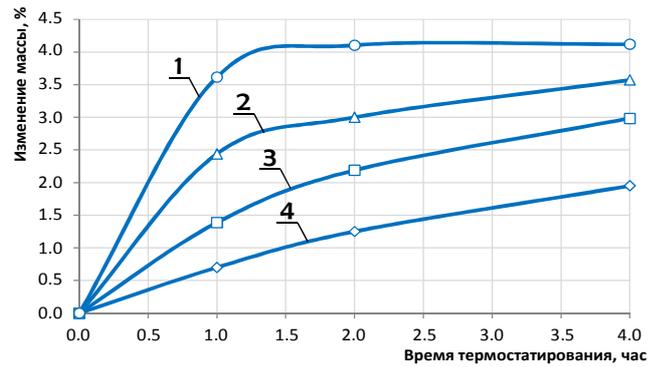


Рис. 7 – Изменение массы капсул от времени выдержки: 1 – 140 °С; 2 – 150 °С; 3 – 160 °С; 4 – 170 °С

Наиболее значительное снижение разрушающего усилия наблюдается при температуре 170 °С. Влияние температуры 140 °С на прочность капсул незначительно, а при 150 °С прочность снижается всего на 4 %. На термограмме дифференциальной сканирующей калориметрии альгината кальция обнаружены две аномалии (рис. 8). 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 материала стенок капсул – альгината кальция, которые происходят при этих температурах (рис. 9).

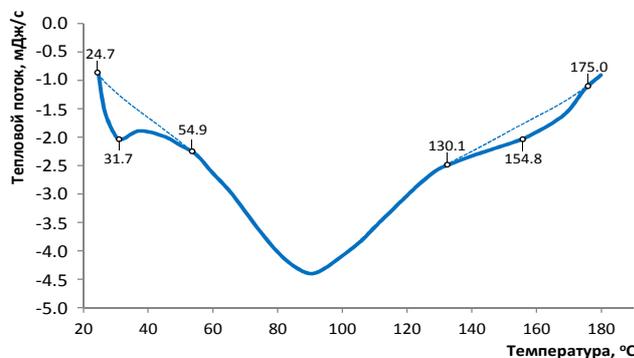


Рис. 8 – Термограмма ДСК альгината кальция

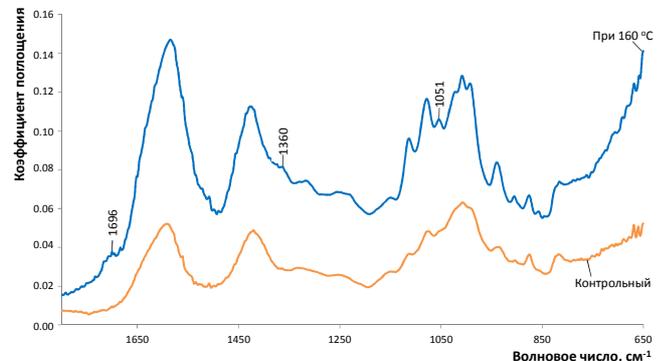


Рис. 9 – ИК-спектры альгината кальция до и после термостатирования при 160 °С

Увеличение интенсивности колебаний всех связей и появление новых пиков на ИК-спектре при волновых числах 1696; 1360 и 1051 см<sup>-1</sup> наблюдается после изотермической выдержки альгината кальция. Эти пики указывают на появление дополнительных колебаний в области асимметричных и симметричных валентных колебаний С-О группы 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.

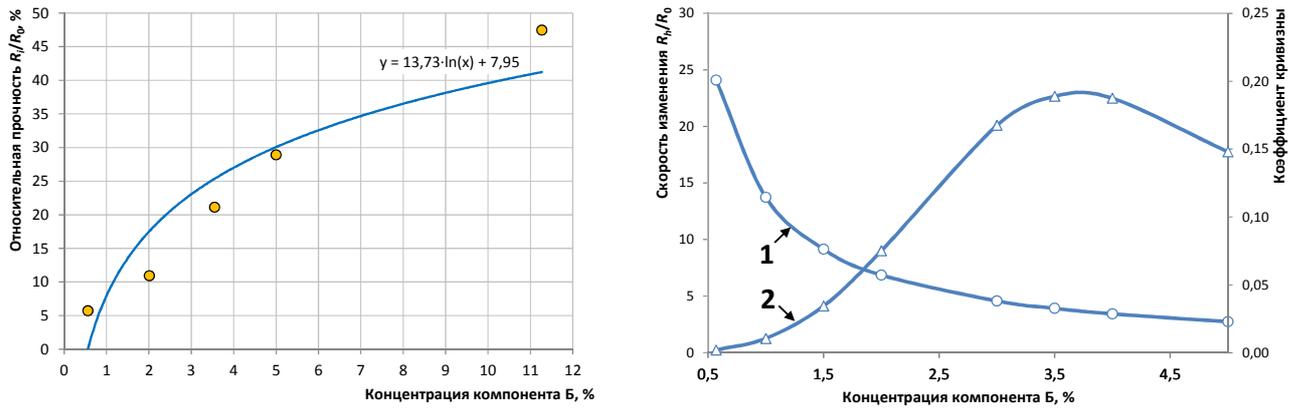


Рис. 10 – Степень изменения  $R_h/R_0$  (а) и параметры скорости изменения  $R_h/R_0$  (б): 1 – скорость изменения  $R_h/R_0$ ; 2 – коэффициент кривизны

Интенсивность полимеризации AR-полимера увеличивается в присутствии активатора. Активатором является смесь серы, оксида марганца  $MnO_2$  и тетраметилтиурамдисульфида в соотношении 6,1 : 3,7 : 1,0. Для установления оптимальной концентрации активатора в составе вяжущего оценивалась степень восстановления, которая достигается при склеивании магистральной трещины образцов ЦМА после изгиба (рисунок 10а).

При изменении концентрации активатора в составе вяжущего степень восстановления предела прочности при изгибе  $R_h/R_0$  увеличивается асимптотически ( $R_0$  и  $R_h$  – предел прочности при изгибе до и после восстановления, соответственно). Анализ рисунка 10 свидетельствует, что при увеличении концентрации активатора более 3,5 % от массы битума в составе асфальтобетонной смеси происходит уменьшение эффективности действия единицы его объема. Для дальнейших исследований использовался битум БНД 60/90 с добавлением активатора 3,5 %.

## 2. Способность асфальтобетона к самовосстановлению.

Для экспериментальных исследований использовался щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15, отвечающий требованиям ГОСТ 31015. 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 оценки эффекта собственного потенциала самовосстановления использовался подход, учитывающий остаточную прочность, относительно которой рассчитывалась собственный потенциал самозалечивания:

$$HP = \frac{R_h - R_1}{R_0} \cdot 100\% , \quad (2)$$

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

Зависимость изменения собственного потенциала самовосстановления асфальтобетона описывается уравнениями регрессии вида  $HP = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2$ , где  $X_1$  –

температура среды при восстановлении, °С;  $X_2$  – время экспозиции, день, коэффициенты для которых представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры уравнений регрессии для ЩМА-15 на битумах различного состава

Битум	Групповой состав, %				Схема испытаний	Значения коэффициентов уравнения регрессии					
	ПН	АС	См	Ас		$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_{12}$	$B_{11}$	$B_{22}$
БНД <sub>1</sub>	7,1	38,5	32,2	22,2	Сжатие	14,7	5,09	0,76	-1,35	1,17	0,09
					Изгиб	12,0	7,95	4,86	1,05	0,12	0,79
БНД <sub>2</sub>	6,5	32,9	38,5	22,1	Сжатие	3,2	0,05	-0,66	-1,23	-0,55	-0,23
					Изгиб	30,7	15,27	-2,07	-8,72	2,39	-5,06

Примечание: БНД<sub>1</sub> – исходный битум БНД 60/90; БНД<sub>2</sub> – битум БНД 60/90 после старения 8 часов при 160 °С; ПН – парафино-нафтоновые; АС – ароматические соединения; См – смолы; Ас – асфальтены.

Доминирующее значение в вопросе самозалечивания битума среди мальтенов играют именно ароматические соединения, что может быть связано с очередностью перехода в расплав отдельных фракций битума при повышении температуры: ароматические соединения, имея меньшую температуру размягчения, обуславливают большее участие их молекул в свободном тепловом движении, чем молекул смол. Наибольший эффект от действия температуры на собственный потенциал самозалечивания соответствует значениям приближенным к температуре размягчения применяемого битума. Однако в таких условиях асфальтобетон теряет свою несущую способность, склонен к избыточным деформациям и не может эксплуатироваться, поэтому использование способности молекул битума самопроизвольно срачиваться в качестве механизма для продления эксплуатационной пригодности покрытий является затруднительным. Таким образом, при разработке модификаторов для самовосстановления асфальтобетона необходимо учитывать собственный потенциал к самовосстановлению асфальтобетона, обусловленный тиксотропией и термопластичной природой битумного вяжущего в его составе.

### 3. Закономерности синтеза и свойства самовосстанавливающегося асфальтобетона с капсулированным модификатором.

При уплотнении асфальтобетонной смеси на капсулы с модификатором оказывает воздействие давление, что можно представить в виде схемы с действующими напряжениями по трем направлениям осевому ( $\sigma_t$ ), радиальному ( $\sigma_r$ ) и меридиональному ( $\sigma_m$ ). В предельном состоянии  $(\sigma_r - \sigma_t) = (\sigma_r - \sigma_m) = \sigma_u$ , при граничных условиях  $\sigma_r(r_n) = -p$  и  $\sigma_r(r_b) = 0$  величина предельного давления при уплотнении смеси рассчитывается в соответствии с формулой:

$$p_T \cong 4\sigma_u \cdot \frac{h}{D} \cdot \left(1 - \frac{h}{D}\right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\sigma_u$  – прочность материала стенок капсулы;  $D$  – диаметр капсулы,  $h$  – толщина стенки капсулы.

При капсулировании модификатора основной задачей с учетом прочности материала стенок капсулы является сформировать необходимые ее геометрические параметры ( $h/D$ ), при ко-

торых обеспечивается прочность капсул, превышающая распределенную нагрузку при уплотнении (рис. 11).

Результаты расчета показывают, что регулирование толщины и/или диаметра капсул с концентрации восстанавливающего агента, 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, что свидетельствует о возможности создания асфальтобетона с капсулами.

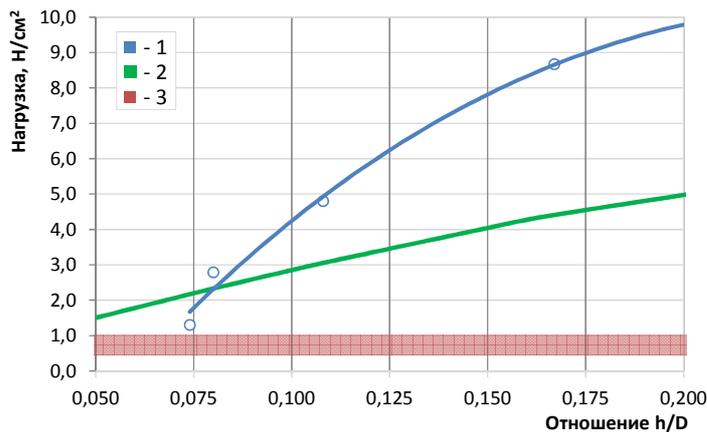


Рис. 11 – Влияние отношения  $h/D$  на показатели: 1 – фактическая прочность капсул; 2 – теоретическое допустимое давление при уплотнении смеси; 3 – зона фактической максимальной распределенной нагрузки

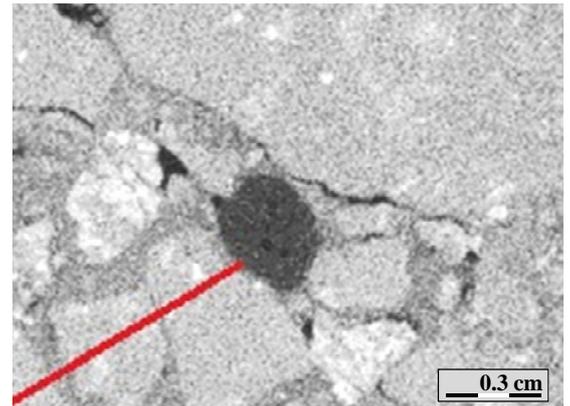


Рис. 12 – Томографический снимок образца асфальтобетона с капсулированным модификатором после уплотнения

С целью проверки теоретических результатов, изготовленные асфальтобетонные образцы исследовались с помощью томографа (рис. 12). Анализ, полученных с помощью томографии, изображений показывает, что большинство капсулы после завершения процесса приготовления смеси и ее уплотнения остаются целостными. Это подтверждает теоретические расчеты и доказывает возможность создания асфальтобетона с капсулами.

Оптимальное содержание капсулированного модификатора (подсолнечного масла и AR-полимера) определялось по показателю интенсивности самовосстановления предела прочности при сжатии образцов ЦМА-15, который оценивался после повторных измерений через каждые 7 суток (период отдыха). По значениям прочности рассчитывался индекс самовосстановления  $HI$  (рис. 13) и коэффициент самовосстановления  $k_h$  (рис. 14):

$$HI = \frac{R_h}{R_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$k_h = \frac{1 - R'_h/R'_0}{1 - R_h/R_0} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $R'_0$  и  $R_0$  – показатель прочности асфальтобетона до восстановления без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно, МПа;  $R'_h$  и  $R_h$  – показатель прочности асфальтобе-

тона после восстановления без капсул и с капсулированным модификатором, соответственно, МПа.

Индекс самовосстановления (рис. 13) отражает относительную прочность асфальтобетона после периода восстановления, включая собственный потенциал самовосстановления материала и эффект от действия капсул с модификатором, а также величину остаточной прочности, которой обладает испытанный образец после теста.

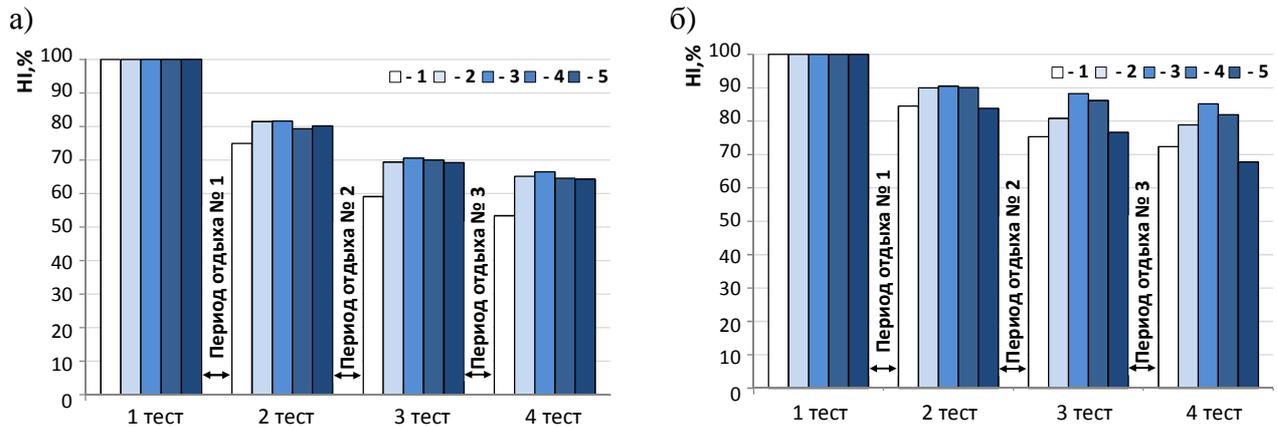


Рис. 13 – Изменение прочности АБ после повторных испытаний на сжатие с различным содержанием капсулированного масла (а) и AR-полимера (б):

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

Коэффициент восстановления учитывает относительную разницу потери прочности асфальтобетона, исключая вклад собственного потенциал самовосстановления материала и величину остаточной прочности, что позволяет оценить эффект от применения капсулированного модификатора (рис. 14). 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.

Эффективность самовосстановления с применением капсулированного AR-полимера в 1,87 раза больше чем при использовании капсулированного подсолнечного масла, который рассматривался как аналог разрабатываемого модификатора. Общая потеря прочности после 4 тестов на сжатие образцов асфальтобетона с капсулированным AR-полимером на 46 % меньше, чем без него.

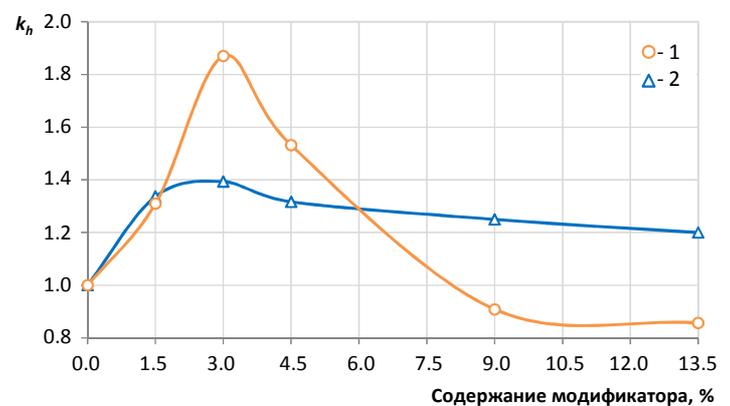


Рис. 14 – Зависимость  $k_h$  от содержания капсулированного модификатора: 1 – AR-полимер; 2 – подсолнечное масло

Таким образом, для дальнейших исследований самовосстанавливающегося асфальтобетона использовалась концентрация капсулированного модификатора равная 3 % от массы битума. Важными показателями свойств, отражающих эффективность самовосстановления, являются так же скорость этого процесса и стойкость структуры после самовосстановления.

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.

Стойкость структуры асфальтобетона после самовосстановления оценивалась по скорости потери прочности в результате повторных испытаний на сжатие: 4 теста и 3 периода отдыха в течение 7 суток. Полученные значения прочности использовались для расчета коэффициента выхода из строя, который рассчитывался исходя из уравнений линейной регрессии (рис. 15), описывающих снижение прочности до критического значения:

$$k_D = \frac{(b'_0 - R_{кр}) \cdot b_1}{b'_1 \cdot (b_0 - R_{кр})} \quad (6)$$

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.

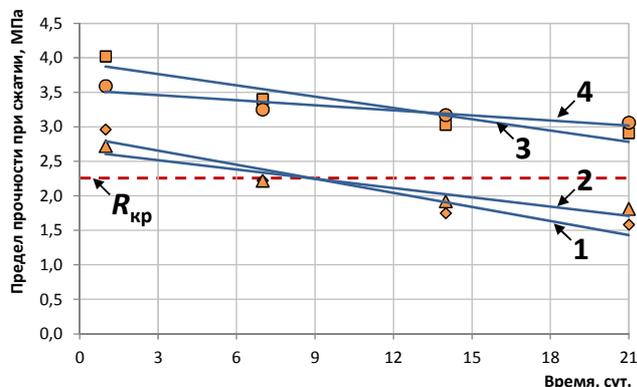


Рис. 15 – Кинетика изменения прочности при повторных испытаниях на сжатие образцов ЩМА: 1 – контрольный состав; 2 – с капсулированным маслом; 3 – с активатором; 4 – с активатором и капсулированным AR- полимером

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 ЩМА без капсул, но с активатором в составе равен 1,7, а относительно ЩМА контрольного состава – 5,6. Данные результаты свидетельствуют, что раз-

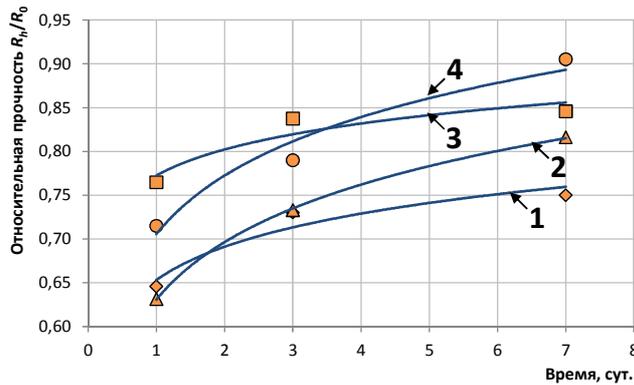


Рис. 16 – Кинетика изменения относительной прочности при сжатии образцов ЩМА: 1 – контрольный состав; 2 – с капсулированным маслом; 3 – с активатором; 4 – с активатором и капсулированным AR-полимером

происходит увеличение показателя относительной прочности, характеризующей увеличение эффекта самовосстановления во времени. При этом данный процесс характерен как для образцов асфальтобетона без капсулированного модификатора, так и с капсулами в составе. Этот процесс обуславливается собственным потенциалом к самовосстановлению за счет тиксотропии и термопластичных свойств вяжущего. Анализ уравнений зависимостей скорости самовосстановления и кривизны этих кривых показывает, что скорость самовосстановления асфальтобетона в присутствии капсулированного модификатора больше, чем в контрольных образцах 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 наличие в составе ЩМА активатора 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 (табл. 3).

**Таблица 3.** Значения критериев качества, отражающих самовосстановление асфальтобетонов

Наименование показателя	Символ	Ед. изм.	Значения для ЩМА-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, скорости самовосстановления и коэффициента выхода из строя доказывают, что использование капсулированного моди-

работанный 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 (рис. 16).

Анализ полученных зависимостей показывает, что в течение наблюдаемых 7 суток

фикатора на основе AR-полимера обеспечивает самостоятельное восстановление способности асфальтобетона сопротивляться механическим воздействиям.

Важным условие эффективности применения капсулированного модификатора является обеспечение соответствия показателей свойств асфальтобетона требованиям нормативных документов. В табл. 4 представлены основные свойства ЩМА с применением разрабатываемого капсулированного модификатора.

**Таблица 4.** Основные свойства ЩМА с капсулированным модификатором

Наименование показателя	Требования ГОСТ	ЩМА-15	Значения показателя для ЩМА с капсулами		Значения критерия качества для ЩМА с капсулами	
			Масло	AR-полимер	Масло	AR-полимер
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	1,58	1,46
Предел прочности при сжатии при, МПа: температуре 20 °С температуре 50 °С	не менее 2,2	3,0	2,8	3,6	0,93	1,20
	не менее 0,65	1,1	0,7	1,2	0,64	1,09
Сдвигоустойчивость: Коэффициент внутреннего трения Сцепление при сдвиге при 50 °С, МПа	не менее 0,93	0,94	0,92	0,93	0,87	1,15
	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	0,85	1,19
Водостойкость (длительная)	не менее 0,85	0,92	0,89	0,90	0,97	0,98

С целью оценки эффективности разрабатываемого капсулированного модификатора использовался обобщенный критерий качества в виде аддитивно-мультипликативной функции:

$$F_k = \alpha_1 K_{ФМ} + \alpha_2 K_{ЭК} + \alpha_3 K_{СВ} = \alpha_1 \sqrt[3]{k_{R20} k_{R50} k_{R0}} + \alpha_2 \sqrt[4]{k_W k_B k_{СЛ} k_{tg\varphi}} + \alpha_3 \sqrt[3]{k_{SH} k_V k_D}, \quad (7)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  – коэффициенты весомости.

Результаты расчета эффективности разрабатываемого самовосстанавливающегося асфальтобетона с применением капсулированного AR-полимера свидетельствуют о его большей технической эффективности на 33 % (при  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$ ) по сравнению с традиционным ЩМА-15.

Анализ технико-экономической эффективности показал, что самовосстанавливающийся асфальтобетон с капсулированным полимерным модификатором превосходит традиционный ЩМА на 68 %.

Выполнена промышленная апробация разработанного самовосстанавливающегося асфальтобетона в компании АО «Лизен» при ремонтно-восстановительных работах покрытия дороги на экспериментальном участке дороги в районе Тьен Йен, Куангнинь (Вьетнам).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

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:  $BA/A = 26,734C_{al}^{-2,543}$ . Высокая устойчивость альгинатных эмульсий к расслоению соответствует структурированной системе, начало разрушения которой определяется отношением ВА/А и может быть описано зависимостью  $t_d = -0,5216 \cdot BA/A + 10,25$ . 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 оказы-

вает 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 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.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в исследовании способности самовосстановления в условиях действия динамических механических нагрузок и/или погодных-климатических факторов. Поиск новых модификаторов для капсулирования, и способов синтеза капсулированных модификаторов, а также расширение методологических подходов для оценки свойств самовосстановления асфальтобетонов.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Иноземцев С.С., Королев Е.В., **До Т.Ч.** Самовосстановление асфальтобетона с использованием инкапсулированного модификатора // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 58–69.
2. Иноземцев С.С., **До Т.Ч.**, Королев Е.В. Отечественный опыт исследования в области строительных материалов с функцией самовосстановления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 8–22.
3. Иноземцев С.С., **До Т.Ч.** Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // Вестник МГСУ. 2020. № 10. С. 1407–1424.

### **Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science:**

4. Inozemtcev, S., Jelagin, D., Korolev, E., Fadil, H., Partl, M.N., **Do Trong, T.** Experimental and numerical study on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent. *Materials and Structures // Materiaux et Constructions*, 2022, 55(9) 230.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

**Статьи, опубликованные в других изданиях:**

8. Иноземцев С.С., Королев Е.В., **До Т.Ч.** Перспективы использования метода акустической эмиссии для исследования самовосстанавливающихся асфальтобетонов // В сборнике: Технические науки: проблемы и решения. Сборник статей по материалам XXX Международной научно-практической конференции. 2019. С.157–164.

9. **До Т.Ч.**, Иноземцев С.С. Поисковые исследования битумно-минеральных композитов с помощью акустико-эмиссионного метода // В сборнике Актуальные проблемы строительной отрасли и образования-2021. Сборник докладов Второй национальной научной конференции. Москва. 2022. С. 262–265.

10. **Т.Ч. До**, С.С. Иноземцев, Теоретические предпосылки самовосстановления в асфальтобетонах // Сборник материалов II Всероссийской конференции, посвящённой столетнему юбилею Московского государственного строительного университета МИСИ-МГСУ (г. Москва, 18-19 ноября 2021 г.)/ Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2021. – С.172–176.

11. **До Т.Ч.**, Столяров В.В., Сусанина Т.В., Стибунов Д.В., Иноземцев С.С. Свойства асфальтобетона с инкапсулированным модификатором // Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции – Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2023. С. 117–121.

12. Иноземцев С.С., Королев Е.В. **До Чонг Т.**, Прочность связей AR-полимера при самовосстановлении асфальтобетона // В сборнике: Перспективные задачи инженерной науки. Сборник статей XIV Международного научного форума. Москва, 2023. С. 176-180.