



Московский Автомобильно-Дорожный
Государственный Технический Университет (МАДИ)
Кафедра «Строительство и эксплуатация дорог»

Повышение эффективности холодной регенерации дорожных одежд

д.т.н. проф. Ярмолинский В.А.
ст. преподаватель Буданова Е.С.





Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 года № 3363-р **предусматривает реализацию долгосрочных целей и задач развития транспортной системы страны. Одними из важнейших задач являются – повышение пространственной связанности и транспортной доступности территорий, увеличение объёма и скорости транзита грузов и развитие мультимодальных логистических технологий, а также ускоренное внедрение новых технологий.**

Согласно постановлению Правительства РФ от 30 мая 2017 г. № 658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения», нормативные межремонтные сроки для автомобильных дорог I – IV категорий должны составлять для капитального ремонта – 24 года, для ремонта – 12 лет

Межремонтные сроки проведения работ по ремонту и капитальному ремонту нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования

Тип дорожной одежды	Категория автомобильной дороги	Межремонтные сроки проведения работ	
		по ремонту, лет	по капитальному ремонту, лет
Капитальный	IA, IB, IB	12	24
	II		
	III		
	IV		
Облегченный	III	12	24
	IV		
Переходный	IV	12	24
	V	5	10
Низший	V	3	6



- Для реализации поставленных в **Транспортной стратегии Российской Федерации** задач имеется **ряд сдерживающих факторов**. Одними из которых являются низкие фактические сроки службы дорожных конструкций в регионах характеризующимися сложными природно-климатическими условиями, к которым можно отнести **районы I и II ДКЗ**.
- Обеспечить требуемые нормативные межремонтные сроки дорожных конструкций в рассматриваемых условиях сложная задача, требующая **применение новых материалов и эффективных ресурсосберегающих технологий**, позволяющих снижать стоимость ремонтных работ и одновременно повышать капитальность и прочность дорожных конструкций.
- К одной из таких технологий следует отнести технологию **холодного ресайклинга** асфальтобетонных покрытий с устройством укрепленных однородных слоев асфальтогранулобетона, используемых в качестве оснований дорожных конструкций. Данный способ позволяет получить дорожную одежду со сроком службы, аналогичным срокам при новом строительстве.

Одна из причин снижения сроков службы автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями связана со снижением прочности несущих слоев основания:

- 1) Изначальное строительство автомобильных дорог с относительно слабым неукрепленным основанием;
- 2) Изменение качественных характеристик слоев несущего основания с течением времени вследствие совокупного воздействия факторов.
- 3) Снижение прочности и плотности грунтового основания в условиях избыточного увлажнения и глубокого сезонного промерзания.





Холодная регенерация (ресайклинг)

Холодная регенерация (ресайклинг) – технология, при помощи которой за счёт смешивания существующих повреждённых слоёв покрытия и основания дорожной одежды с вяжущими и(или) другими материалами создаются новые конструктивные слои дорожных одежд с заданными транспортно-эксплуатационными характеристиками.

Основой технологии холодного ресайклинга является измельчение и перемешивание существующего дорожного покрытия, а в отдельных случаях и основания, посредством фрезерования и введения в образовавшийся материал нового инертного материала заданной фракции (для создания оптимальной смеси), вяжущего и других улучшающих добавок.

Достоинства технологии:

- Сохранение невозобновляемых природных ресурсов;
- Сохранение окружающей среды и снижение количества отходов;
- Энергосбережение;
- Сокращение сроков дорожных работ;
- Сохранение существующей геометрии автомобильной дороги;
- Исправление профиля покрытия и поперечного уклона автомобильной дороги;
- Повышение ровности дорожного покрытия;
- Экономия средств в сравнении с традиционными методами восстановления асфальтобетонных покрытий.

**ресайклинг
«на заводе»
«ХРУ»**

Сфрезерованный материал дорожного покрытия используется для переработки на асфальтобетонном заводе или специальной мобильной установке для производства АГБ-смеси



**ресайклинг
«на месте»
«ХРМ»**

Слой дорожного основания или покрытия устраивается «на месте» с помощью ресайклера, который с помощью встроенного фрезерно-смесительного барабана разрушает дорожную одежду и перемешивает ее с добавлением вяжущего. После прохода ресайклера получается слой АГБ-смеси, который уплотняется катками



комбинированный метод

Сочетается использование обоих методов: «на месте» и «на заводе», верхний слой асфальтобетона на глубину до 150 мм сфрезеровывается, вывозится и складывается на площадке. После чего производится ресайклинг «на месте» дорожной одежды на глубину до 200 мм со стабилизацией вяжущими. На площадке асфальтовая крошка перемешивается с вяжущими в установке и затем укладывается слоем толщиной до 150 мм на ресайклированный «на месте» слой основания.



Обзор нормативных документов технологии холодной регенерации

1) **ОДМ 218.6.1.005-2021** – Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации.

2) **СТО НОСТРОЙ 2.25.159-2014** – Холодная регенерация конструктивных слоев для устройства оснований дорожных одежд.

3) **СТО НОСТРОЙ 2.25.35-2011** – Устройство оснований дорожных одежд. Часть 7. Строительство оснований с использованием асфальтобетонного гранулята.

4) **ГОСТ Р 70197.1(2,3)-2022** – Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона.

5) **СТО 03441578-0005-2016** – Смеси асфальтогранулобетонные и асфальтогранулобетон для автомобильных дорог

6) **ПНСТ 632-2022** – СМЕСИ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЕ ХОЛОДНЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕМОНТИРОВАННОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА

- **Рекомендательный** характер;

- **Отсутствие** поправок на ДКЗ;

- **Не достаточно информативны:**

- **Отсутствие** конкретных данных по выбору **вида вяжущего**;

- **Отсутствие** конкретных данных по выбору **количества вяжущего**;

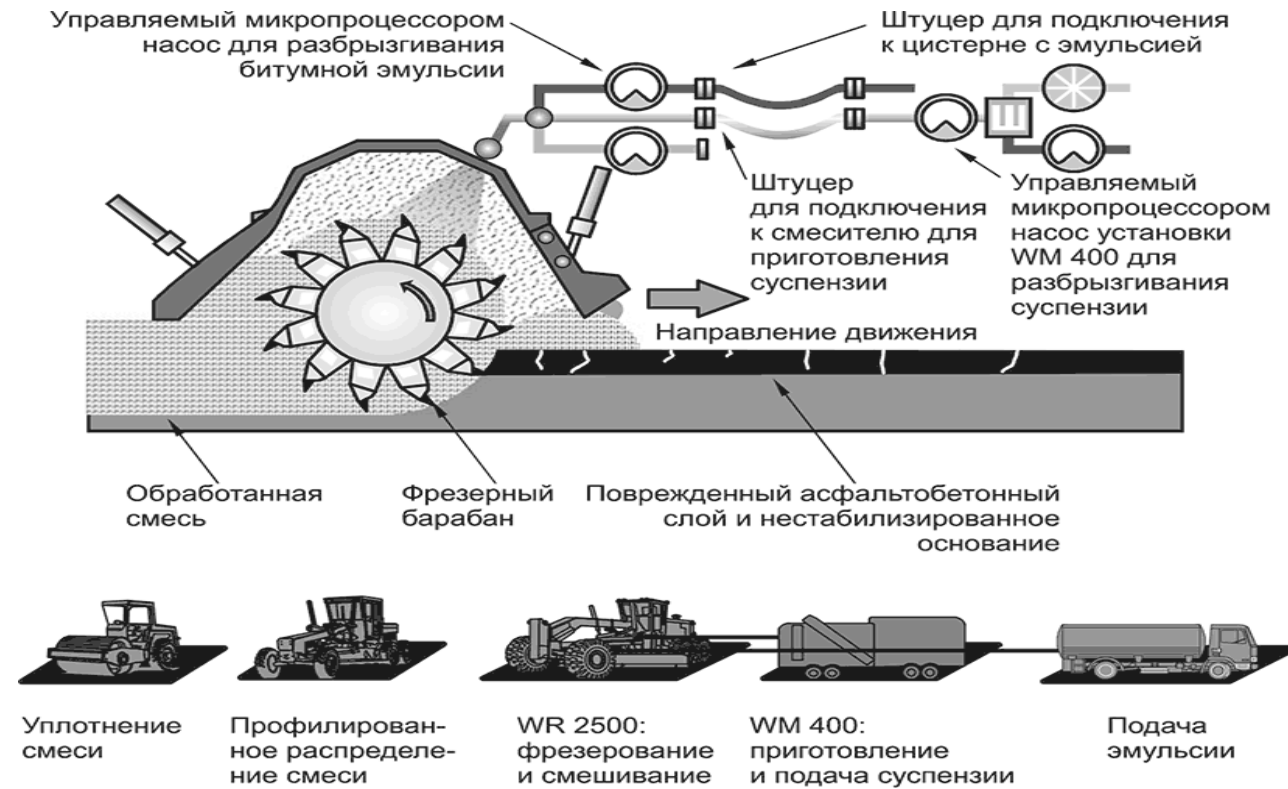
- **Отсутствие** данных по назначению **гранулометрического состава** для методов **ХРМ и ХРУ**.

Вышеуказанные обстоятельства препятствует эффективному использованию технологии холодной регенерации.



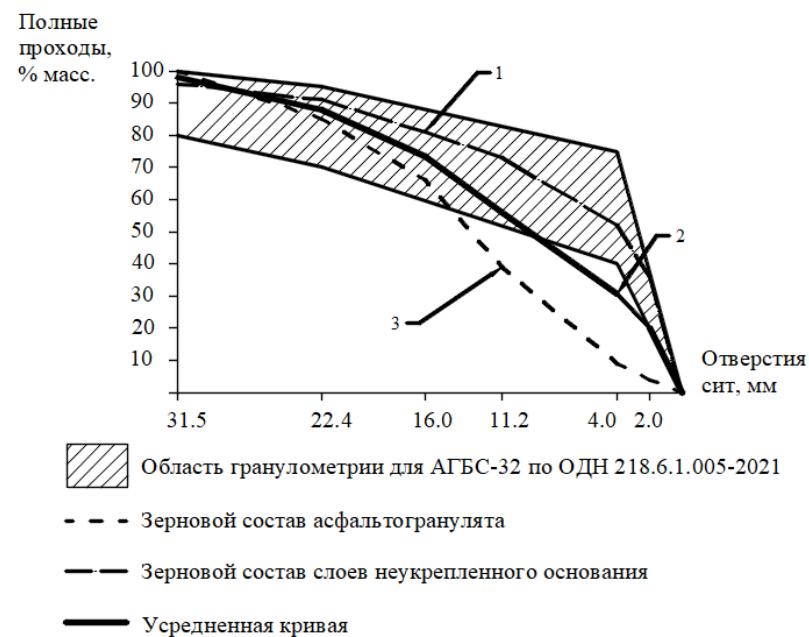
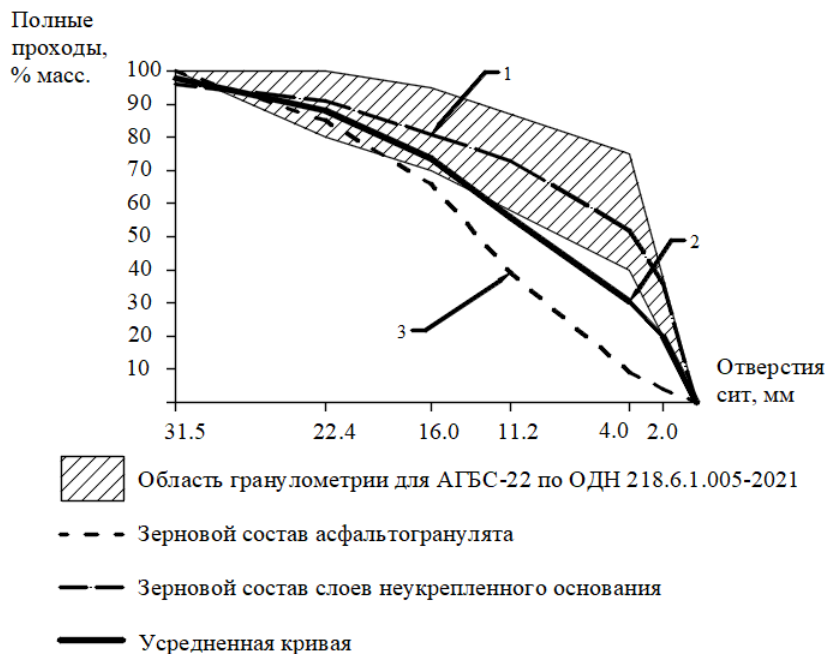
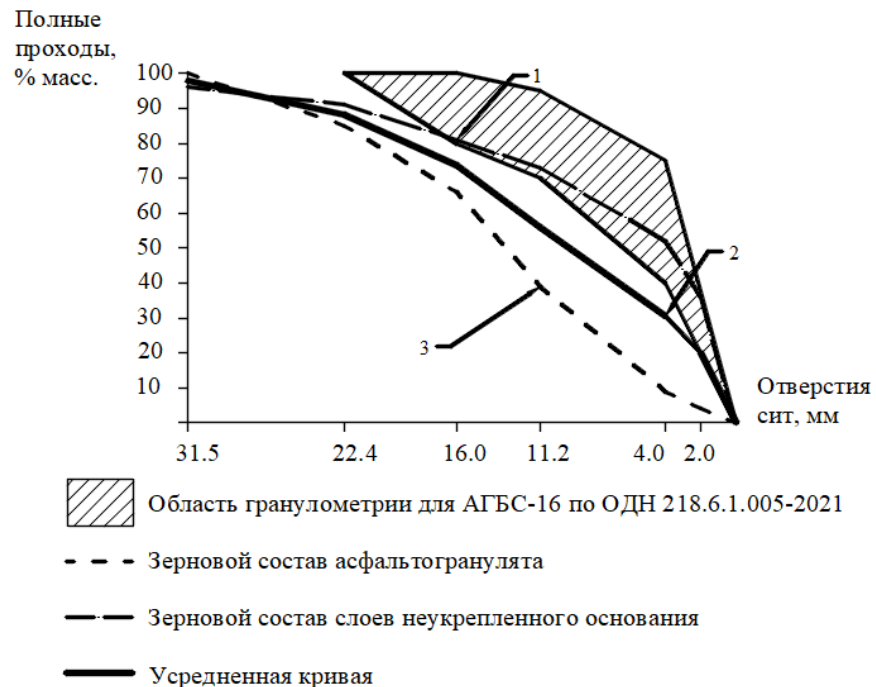
Технология холодного ресайклинга

- Согласно **ОДМ 218.6.1.005–2021**, **АГБС** – это вид органоминеральной смеси, где в качестве основного компонента выступает асфальтогранулят старого асфальтобетона в количестве **не менее 60%** по массе.
- В соответствии с ОДМ 218.6.1.005– 2021 АГБС можно классифицировать по следующим критериям:
 - В зависимости от конструктивного слоя: **АГБС-П** для слоев покрытия; **АГБС-О** для слоев основания;
 - В зависимости от номинально максимального размера зерен применяемого заполнителя: **АГБС 32**; **АГБС 22**; **АГБС 16**.



- В зависимости от используемого вяжущего смеси подразделяются на:
 - **АГБС-Э** с добавлением **битумной эмульсии** (в качестве эмульсий, для достижения максимальной однородности смеси, рекомендуется использовать медленнораспадающиеся битумные эмульсии марки ЭБДК М по ГОСТ Р 58952.1);
 - **АГБС-В** с добавлением **вязкого вспененного битума** (допускается использование битумов нефтяных дорожных вязких по ГОСТ 33133, а также вяжущих полимерно-битумных дорожных по ГОСТ Р 52056 и битумных вяжущих по ГОСТ Р 58400.1);
 - **АГБС-М** с добавлением **минерального вяжущего** (допускается применение портландцемента и шлакопортландцемента по ГОСТ 31108, ГОСТ 30515, ГОСТ 33174 или ГОСТ Р 55224, золы-уноса по ГОСТ 25818 и извести по ГОСТ 9179);
 - **АГБС-К** на **комплексном вяжущем**.

ПОДБОР СОСТАВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ



Обеспечение **оптимальной структуры** материала невозможно без рационального соотношения размеров заполнителя. При производстве холодного ресайклинга методом «на месте» сложно регулировать гранулометрический состав, требуется его **дополнительная корректировка**.

На **гранулометрический состав** холодных регенерированных смесей влияет большое число факторов: исходный зерновой состав и количество слоев фрезеруемого асфальтобетонного покрытия, наличие карт ямочного ремонта, глубина регенерации, возраст существующего покрытия, температура окружающей среды, параметры работы фрезы и т.д.

Исходя из этого, при выполнении холодного ресайклинга методом «на месте» возможно прогнозирование смесей двух типов: **щебеночные; песчаные**.

Полные проходы минерального зерна через сито с отверстием 4 мм согласно ОДМ 218.6.1.005–2021 должны находиться в диапазоне 40–75% масс для трех типов смеси. Подобное требование способствует формированию **песчаных** смесей.



ПОДБОР СОСТАВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Размер ячейки сита, мм	Зерновой состав по стандарту						Фактический зерновой состав материала с дороги	
	АГБС -22		АГБС-16		ОМС-16		Асфальтовый гранулят	Материал основания
	Проходы, %		Проходы, %		Проходы, %		Проходы, %	Проходы, %
16,0	70	95	80	100	90	100	66	81
11.2	-	-	70	95	70	90	39	73
4.0	40	75	40	75	35	60	9	52
2.0	0	0	0	0	20	50	0	36

Авторами произведен анализ зернового состава асфальтогранулята, полученного путем холодного фрезерования верхнего слоя асфальтобетонного покрытия из ЩМА-15 (устроенного в 2013 г.), а также материала несущего основания на участке **Москва — Ярославль автомобильной дороги М-8 «Холмогоры»**.

Для создания оптимальной по зерновому составу смеси требуется дополнительная корректировка, при этом **установлено:**

- фрезерование асфальтобетонных покрытий формирует крупнозернистый материал, требующий **корректировки мелкой фракцией;**
- при регенерации слоев несущих оснований образуются преимущественно мелкозернистая и песчаная смеси, требующие **внесения крупнозернистого скелетного материала;**
- при выполнении работ по методу «на месте» возможно формирование двух типов смеси — **песчаной и щебеночной.**

Рациональное соотношение размеров минерального заполнителя задает тип макроструктуры смеси и обеспечивает **оптимальную структуру материала с наибольшей плотностью и оптимальными показателями физико- механических свойств.**

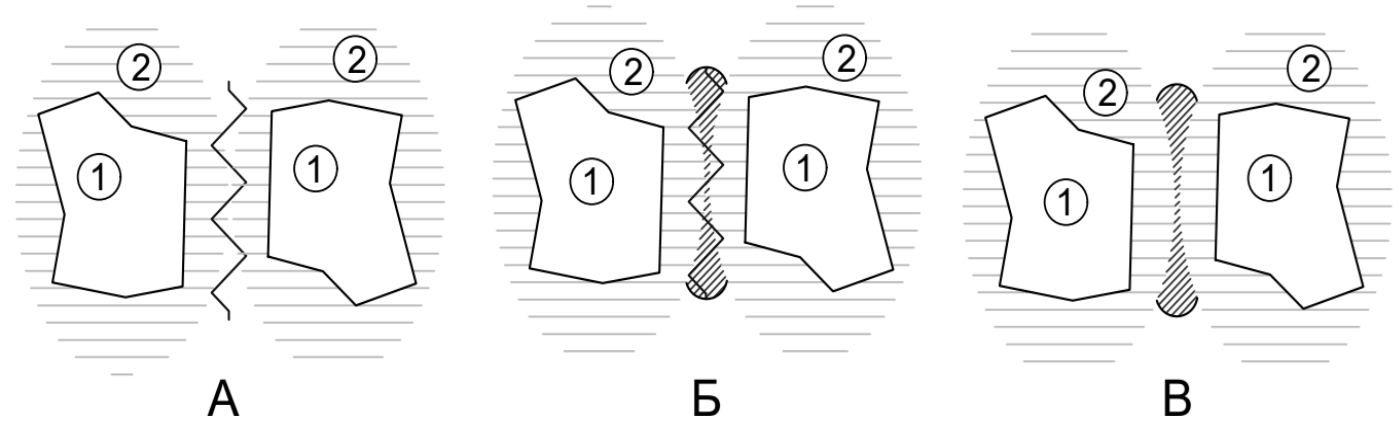
*Для эффективного производства работ методом холодной регенерации в климатических условиях избыточного увлажнения следует корректировать технологический цикл для создания **максимально плотных, прочных и водостойких АГБ.***

Выбор вида и оптимального количества вяжущих АГБ-смесей

- При проведении ремонтных работ методом холодного ресайклинга возникают вопросы **выбора вида и оптимального количества вяжущих АГБ-смесей**, а также **подбора их гранулометрического состава**.
- Структура получаемых АГБС напрямую зависит от **количества и размера зерен асфальтогранулята**, а также **характером связей** между ними.

Структурообразование АГБС усложняется неоднородностью заполнителя.

В процессе дробления отдельный конгломерат содержит несколько различных контактных зон: *«старое вяжущее в АГ — вяжущее»*, *«каменный материал в АГ, покрытый битумной пленкой, — вяжущее»*, *«сколотый каменный материал в АГ — вяжущее»*, а также в АГБС с комплексными и минеральными вяжущими дополнительно протекают процессы гидратации.



- В зависимости от **типа вяжущего** вещества в материалах на основе асфальтогранулята образуются три основных вида связей:
- **А** — жесткие связи минерального вяжущего;
- **Б** — кристаллизационно-коагуляционные связи комплексного вяжущего;
- **В** — коагуляционные связи органического вяжущего;
- 1 — зерно асфальтогранулята; 2 — битумная оболочка зерна асфальтогранулята



Процесс формирования структуры АГБ при холодном ресайклинге необходимо рассматривать в зависимости от вида вводимого вяжущего: **минерального, органического, комбинированного.**

Исследования микроскопической структуры АГБ на основе различных вяжущих проводились с помощью электронного микроскопа **Levenhuk D740T.**

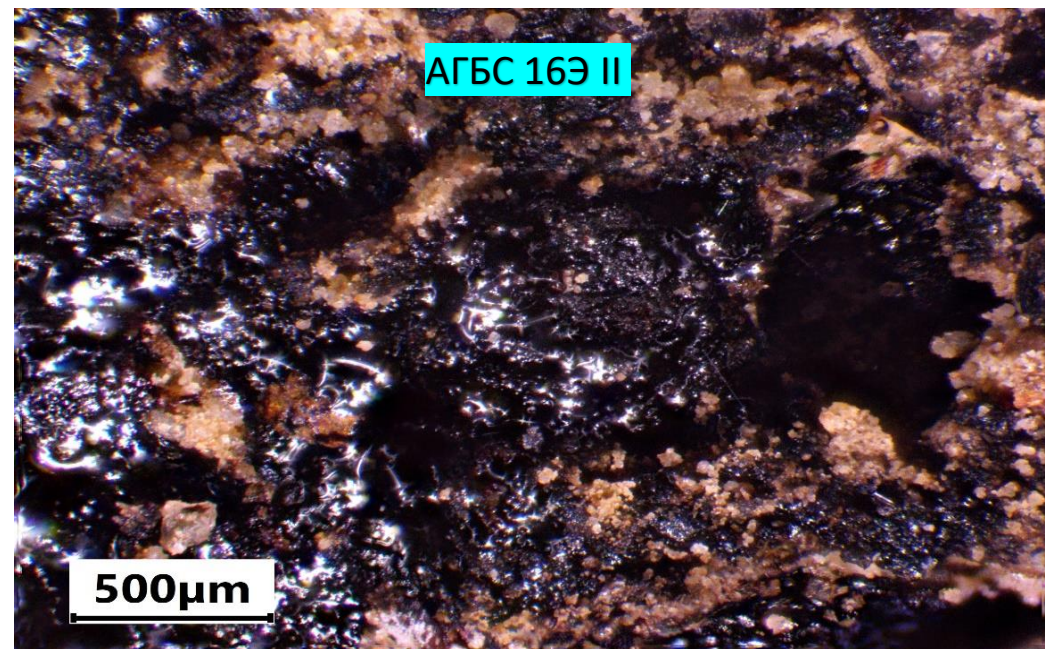
Органическое вяжущее

Структурные связи в образцах образуются за счет вязкости битума объемной фазы, которая представлена продуктами распада битумной эмульсии. Структура преимущественно *коагуляционного типа*. Коагуляционный контакт образуется между частицами твердой фазы, разделенными равновесными прослойками жидкой дисперсионной среды. **Прочность** такого **контакта мала**, так как она определяется молекулярными силами сцепления.

При использовании **битумных эмульсий** возможно формирование двух основных типов структуры материала: связанная (коагуляционная) и частично-связанная (контактно- коагуляционная).

*Применение битумных эмульсий в технологии холодного ресайклинга приводит к удорожанию работ а также к трудности достижения необходимых прочностных качеств АГБ. К основным характеристикам АГБС-Э(В) можно отнести **низкую прочность, высокую деформативность и пластичность.***

При назначении оптимального количества битумной эмульсии в АГБС следует учитывать **удельную поверхность и битумоемкость**, которые для **асфальтогранулята** и **скелетного заполнителя** различны.



а

Текстура асфальтогранулята, обработанного битумной эмульсией в количестве 4%.

Все зерна покрыты вяжущим, при последующей обработке формируется связанная структура материала



б

Текстура скелетного материала, обработанного тем же количеством (4%) битумной эмульсии, где прослеживается формирование частично связанной структуры.



Минеральное вяжущее

Одним из эффективных способов повышения прочности дорожной одежды является устройство **полужестких оснований** на **минеральных вяжущих** с применением технологии ресайклинга.

В образцах на основе минерального вяжущего образуются связи преимущественно **кристаллического типа**.

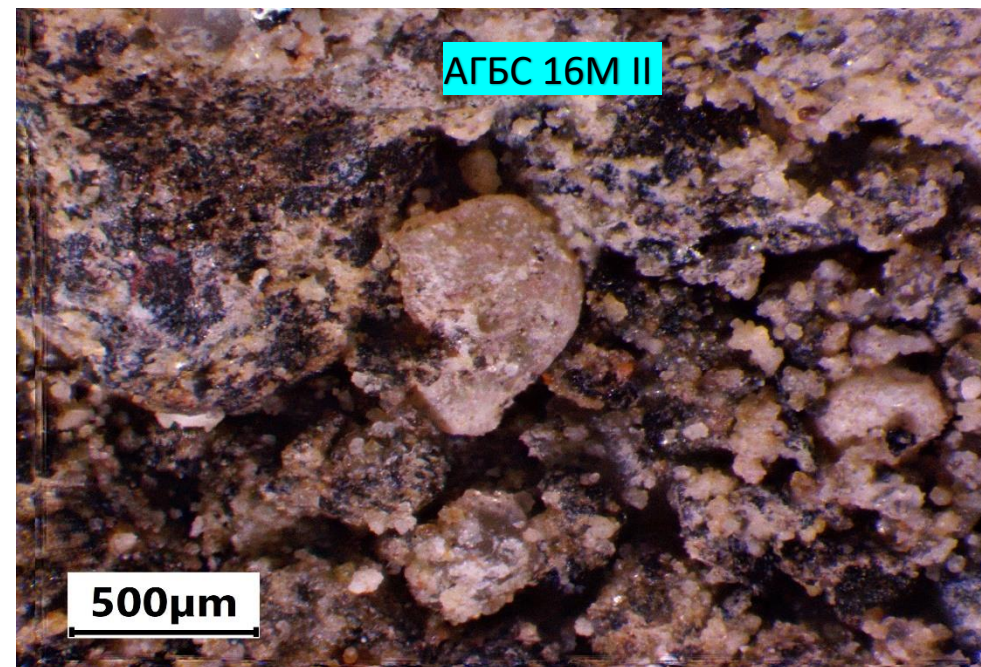
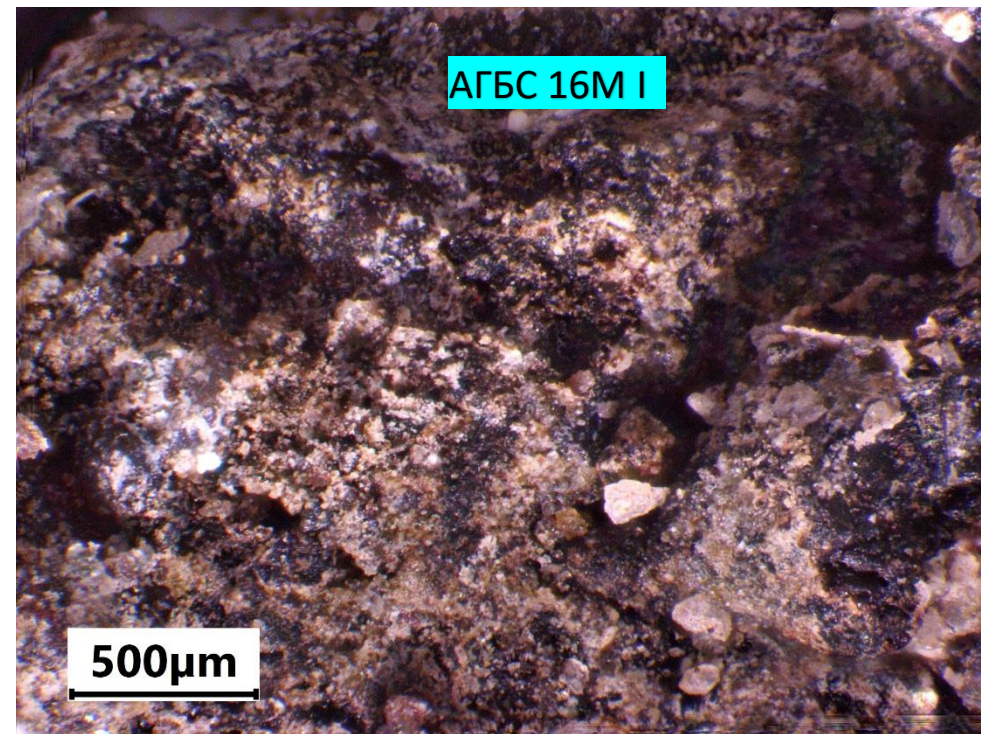
Жесткие кристаллические связи и равномерное распределение минерального вяжущего, **обуславливает высокие прочностные показатели**. АГБ на минеральном вяжущем обладают самыми высокими прочностными показателями.

Прочный фазовый контакт образуется в результате химических фазовых превращений при гидратационном твердении минеральных вяжущих. Контакт разрушается необратимо.

Кристаллические структуры придают материалу **высокую прочность** при **повышении хрупкости**.

На физико- механические свойства АГБ на минеральных вяжущих большое влияние оказывает **степень и интенсивность гидратации**.

Плотная и прочная структура асфальтогранулобетона типа «М» достигается не только правильным подбором компонентов, но и **последовательностью**, а также **длительностью** технологических операций. Исходя из этого, следует определять **наилучший момент для уплотнения смеси без нарушения ее кристаллической структуры**.





Комплексное вяжущее

Наиболее сложные процессы протекают в АГБ на комбинации органического и неорганического вяжущих, **АГБ-смесь типа «К»**.

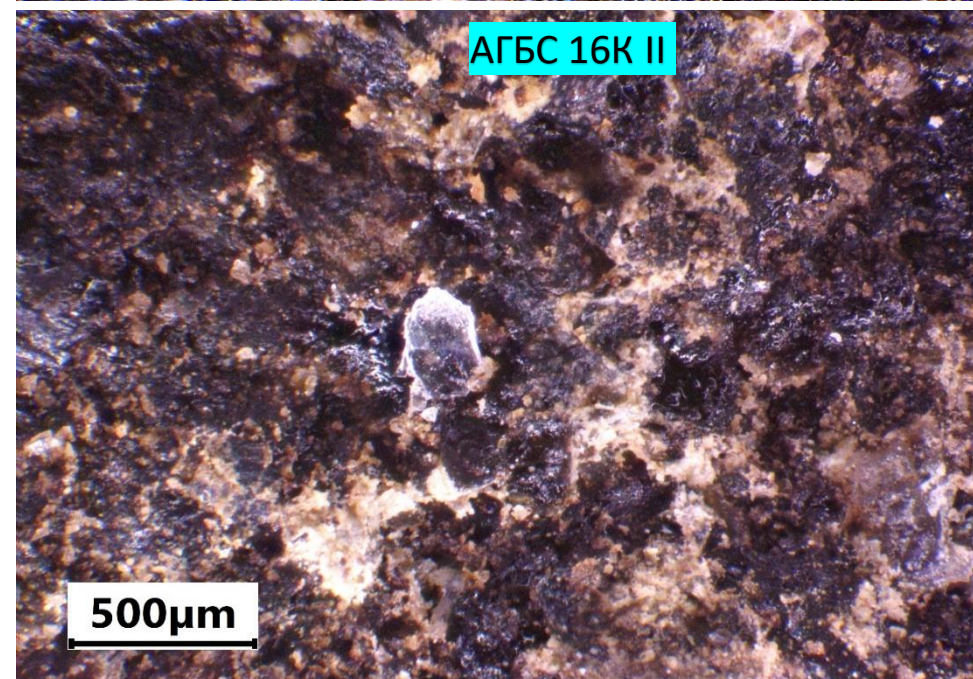
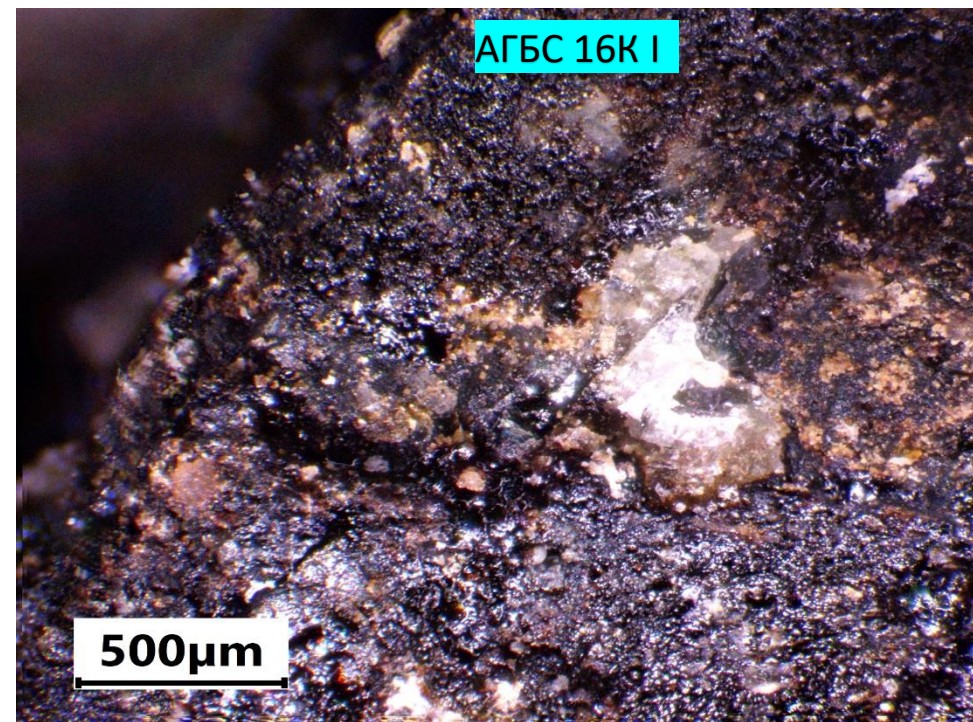
Смесь получается многокомпонентной, эксплуатационные свойства которой **трудно спрогнозировать**. На структурообразование влияет множество факторов, из которых следует выделить реакцию гидратации и гидролиза минерального вяжущего совместно с дисперсным битумом. **Структурные связи** в образцах на комплексном вяжущем образуются за счет **вязкости битума** объемной фазы и **гидратации минерального вяжущего**.

Структура матрицы **коагуляционно-кристаллическая**.

Высокие прочностные показатели обусловлены кристаллической структурой гидратированного портландцемента в комплексном вяжущем. Битумная эмульсия **повышает деформативность материала**.

Согласно исследованиям, минеральное вяжущее с дисперсным битумом является необратимой гетерогенной системой гидрофильно-гидрофобного типа.

На формирование типа структуры значительное влияние оказывает соотношение доли портландцемента и битумной эмульсии, а также механизм взаимодействия «вяжущее — вяжущее» и «вяжущее — заполнитель».



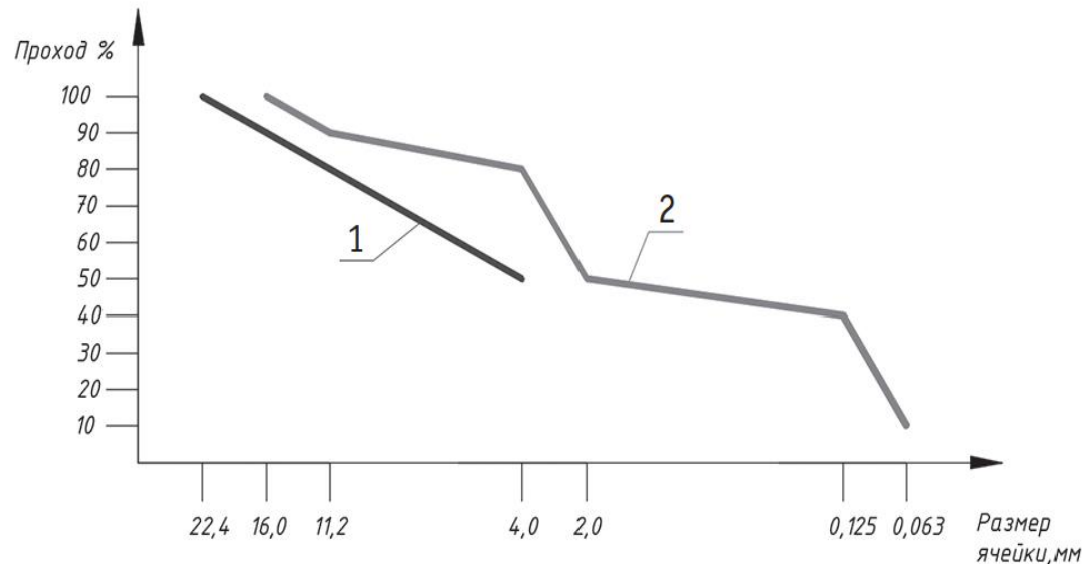


ПОДБОР СОСТАВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

- Был произведен комплекс лабораторных исследований образцов АГБС и дана микроскопическая оценка структуры получаемых материалов в зависимости от применяемого типа вяжущего и гранулометрического состава.
- Для лабораторных исследований были изготовлены две партии АГБС цилиндрических образцов с применением уплотнителя Маршалла с номинально максимальным размером фракции 16 мм:

Компонентный состав образцов

Партия образцов	Асфальтогранулят	Цемент, М500	Вода	Битумная эмульсия ЭБДК-М
I 16К – II 16К	97% – 1115,5 г	3% – 34,5 г (по массе)	2% – 25,9 г (сверх массы)	3% – 34,5 г (сверх массы)
I 16М – II 16М	97% – 1115,5 г	3% – 34,5 г (по массе)	2% – 25,9 г (сверх массы)	
I 16Э – II 16Э	100% – 1150 г	-	-	7% – 80,5 г (сверх массы)



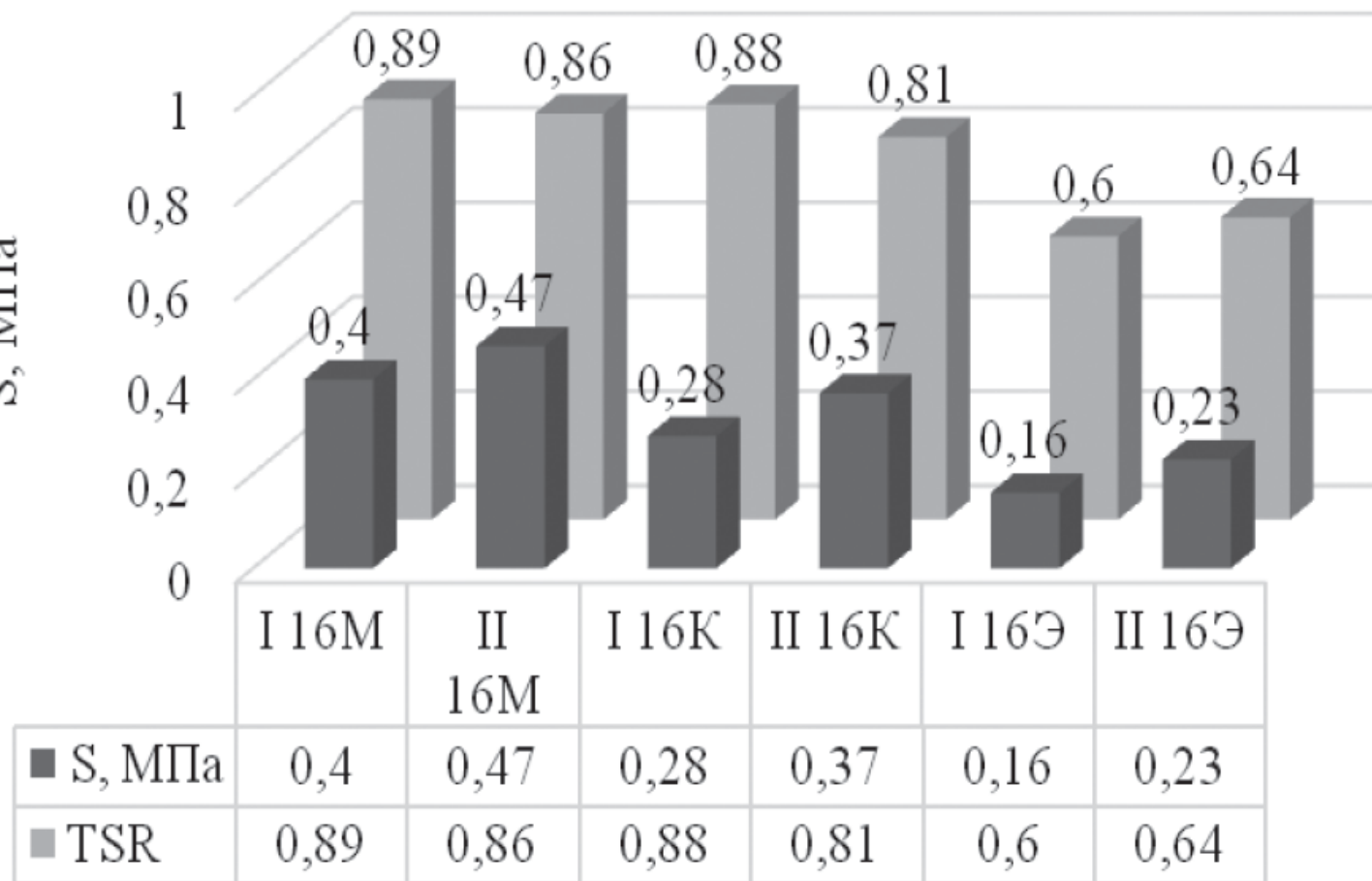
- партия I – образцы с гранулометрическим составом по ОДМ 218.6.1.005-2021 (линия 1);
- партия II – образцы с гранулометрическим составом по ПНСТ 632-2022 (линия 2).

В каждой экспериментальной партии АГБС были изготовлены по три группы образцов в зависимости от применяемого вида вяжущего (минеральное, органическое, комплексное). Критерием для сравнения экспериментальных образцов принята прочность при непрямом растяжении и водостойкость.



ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АГБ

Предел прочности при непрямом
растяжении при температуре, 20 °С,
S, МПа



Сравнение образцов экспериментальных партий: **S, МПа** – предел прочности при непрямом растяжении при температуре 20°С;
TRS – водостойкость

- В результате проведенных исследований, было установлено, что материалы, имеющие более **тонкий гранулометрический состав**, скорректированный минеральным порошком (фракцией менее 0,125мм), обладают лучшими показателями **прочности** при **непрямом растяжении** в среднем на **25% выше**, чем у образцов из другой партии.

- Исследования показали, что применение **эмульсии ЭБДК-М** в качестве вяжущего **не обеспечивает** формирование **АГБС-П** с необходимыми показателями **водостойкости (0,65)** ;

- Наиболее **высокими прочностными** показателями обладают образцы **АГБ** на основе **минерального вяжущего**.

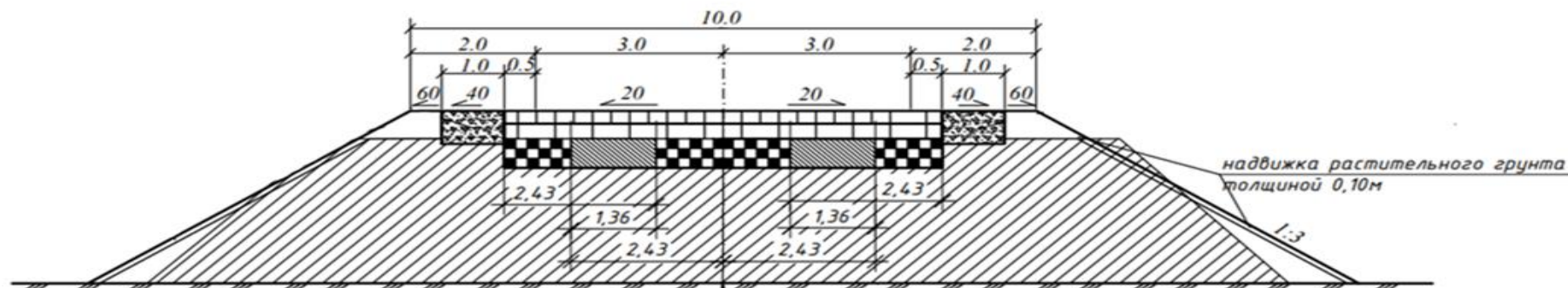


На рассматриваемых участках дорог в конструкциях дорожной одежды был применен слой из органоминеральной смеси следующим компонентным составом:

- асфальтобетонный гранулят с захватом части основания;
- портландцемент М400 – 1,5 %;
- битумная эмульсия ЭБК-3 – 4 %.

Основные рецепты АГБС в ЯО представлены:

1. 1,5% цемента + 4% БЭ
2. 3-4% цемента
3. 3% цемента + 3% БЭ





Материалы и методы исследований

Экспериментальные работы проводились в лабораториях ФГБОУ ВО МАДИ и ЯГТУ. Обработка данных планирования эксперимента выполнялась при помощи пакета MS Office с электронными таблицами Excel.



Обеспечение эффективности технологии холодного ресайклинга
за счет рационального соотношения исходных компонентов

Уровни варьирования факторов эксперимента

Фактор		Размерность	Уровень			Интервал варьирования
			верхний	центр плана	нижний	
			+1	0	-1	
Битумная эмульсия ЭБДК-М	x_1	% сверх АГ	4	2	0	2
Портландцемент М500	x_2	% сверх АГ	4	2	0	2
ЩПС	x_3	% к АГ	100	50	0	50
Воздушная известь	x_4	% сверх АГ	2	1	0	1

Исследование влияния на водостойкость АГБ (y) битумной эмульсии (x_1), портландцемента (x_2), минеральных зерен, имеющих свободную от битума поверхность – ЩПС (x_3), а также введение ионной добавки в виде воздушной извести (x_4).

Дробный факторный эксперимент ДФЭ 2^{4-1} с генерирующим отношением:

$$x_4 = x_1 x_2 x_3$$

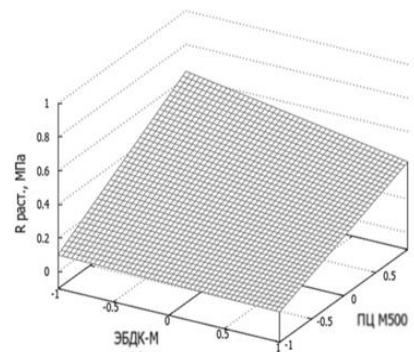
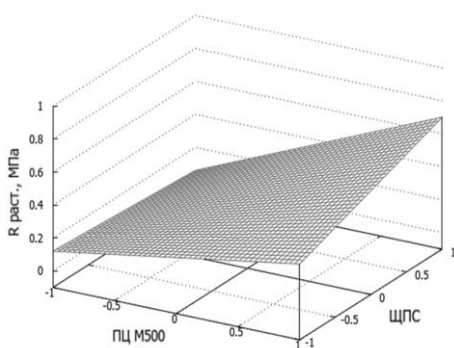
Матрица планирования ДФЭ 2^{4-1}

№ опыта	Уровни варьирования факторов				
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	+	-	-	-	-
2	+	+	-	-	+
3	+	-	+	-	+
4	+	+	+	-	-
5	+	-	-	+	+
6	+	+	-	+	-
7	+	-	+	+	-
8	+	+	+	+	+

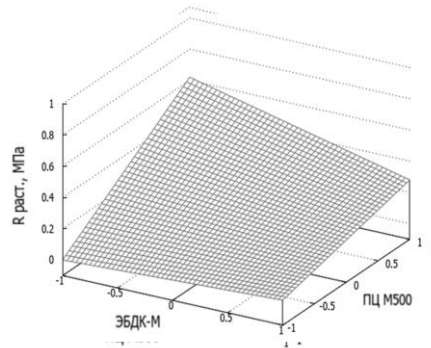
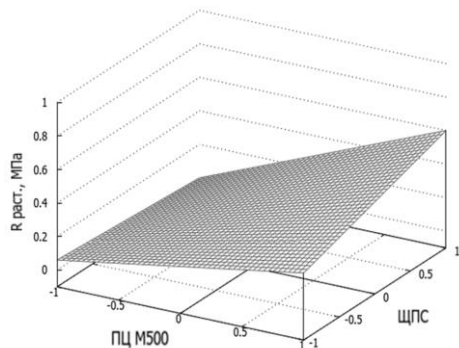


Математическая модель 1 порядка

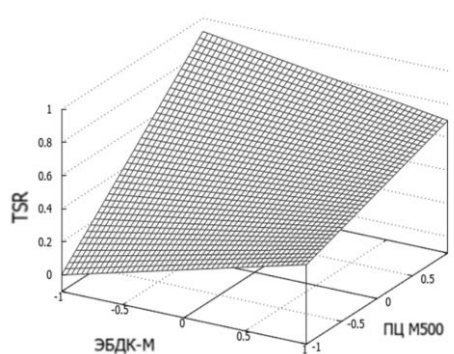
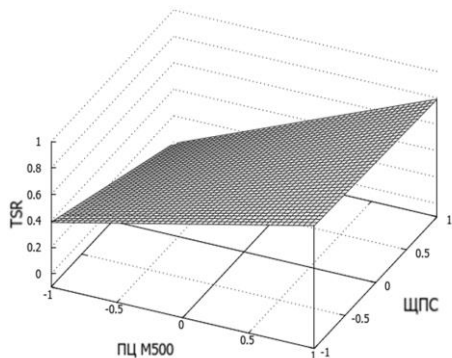
Зависимость прочности ($R_{\text{раст.}}$, МПа) образцов сухой группы от варьирования заданных факторов:
а – портландцемент М500 и щебеночно-песчаная смесь;
б – битумная эмульсия ЭБДК-М и портландцемент М500



Зависимость прочности ($R_{\text{раст.}}$, МПа) образцов водонасыщенной группы от варьирования заданных факторов:
а – портландцемент М500 и щебеночно-песчаная смесь;
б – битумная эмульсия ЭБДК-М и портландцемент М500



Зависимость водостойкости (TSR) от варьирования заданных факторов: а – портландцемент М500 и щебеночно-песчаная смесь; б – битумная эмульсия ЭБДК-М и портландцемент М500



Позволяет оценить степень влияния отдельных факторов, а также эффективность их взаимодействия на прочность и водостойкость АГБС, а также определение интервала варьирования факторов

$$R_{p.\text{сух.}} = 0,31 - 0,06x_1 + 0,22x_2 + 0,07x_3 - 0,05x_1x_2 - 0,07x_1x_3 + 0,10x_2x_3$$

$$R_{p.\text{в/н}} = 0,24 - 0,07x_1 + 0,21x_2 + 0,06x_3 - 0,05x_4 - 0,10x_1x_2 - 0,09x_1x_3 + 0,09x_2x_3$$

$$TSR = 0,50 + 0,04x_1 + 0,31x_2 - 0,11x_3 + 0,03x_4 - 0,15x_1x_2 - 0,16x_1x_3 + 0,09x_2x_3$$



Математическая модель 2 порядка

Аппроксимация зависимости $R_{p.сух.}$, $R_{p.влаж.}$, TRS . от расхода портландцемента/и количественного соотношения скелетный материал/асфальтогранулят

Фактор		Размерность	Уровень			Интервал варьирования
			верхний	центр плана	нижний	
			+1	0	-1	
Расход ПЦ	x_1	%	3,5	2,0	0,5	1,5
Расход Щ/АГ	x_2		86	53	20	33

Аппроксимация зависимости $R_{p.сух.}$, $R_{p.влаж.}$, TRS . от расхода битумной эмульсии и количественного соотношения скелетный материал/асфальтогранулят

Фактор		Размерность	Уровень			Интервал варьирования
			верхний	центр плана	нижний	
			+1	0	-1	
Расход БЭ	x_1	%	5,0	3,0	1,0	2,0
Расход Щ/АГ	x_2		86	53	20	33

Аппроксимация зависимости $R_{p.сух.}$, $R_{p.влаж.}$, TRS . от расхода портландцемента и битумной эмульсии при заданном количественном соотношении скелетного материала и асфальтогранулята

Фактор		Размерность	Уровень			Интервал варьирования
			верхний	центр плана	нижний	
			+1	0	-1	
Расход ПЦ	x_1	%	3,5	2,0	0,5	1,5
Расход БЭ	x_2		5,0	3,0	1,0	33

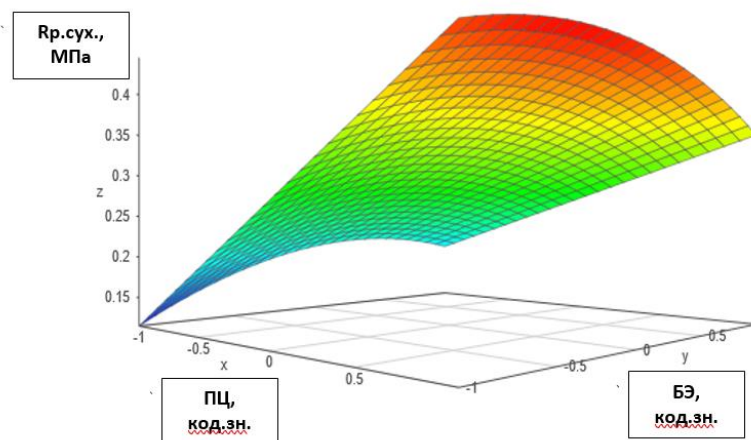




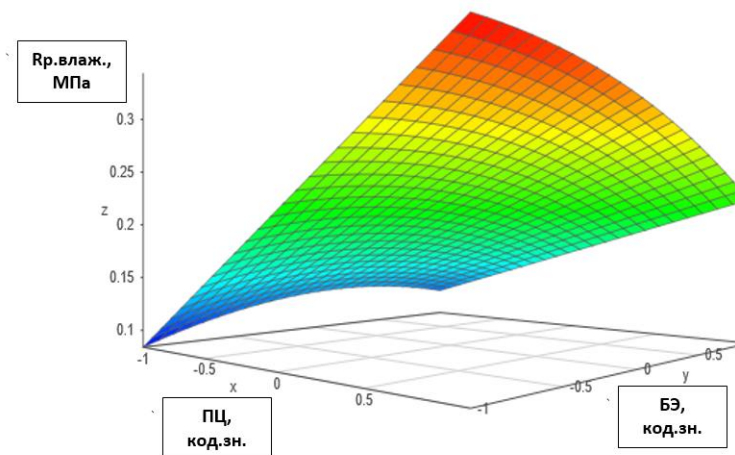
Математическая модель 2 порядка

Аппроксимация зависимости $R_{p.сух.}$, $R_{p.влаж.}$, $K_{вдст.}$ от расхода портландцемента и битумной эмульсии при заданном количественном соотношении скелетного материала и асфальтогранулята

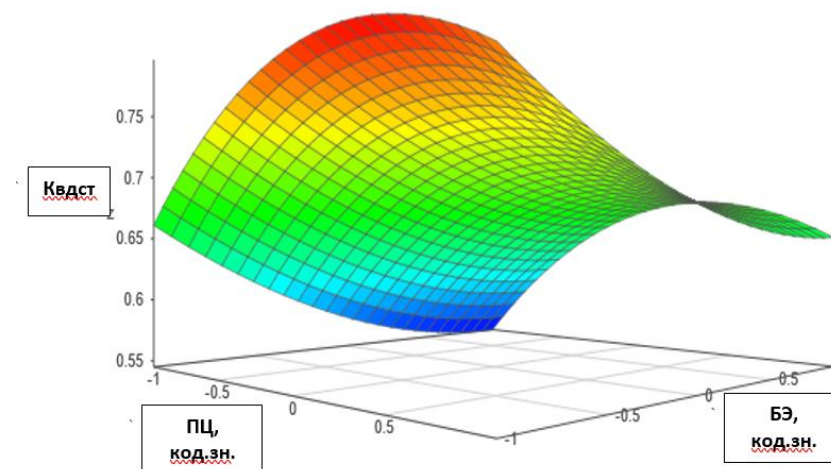
Зависимость прочности образцов сухой группы



Зависимость прочности образцов водонасыщенной группы



Зависимость значения водостойкости



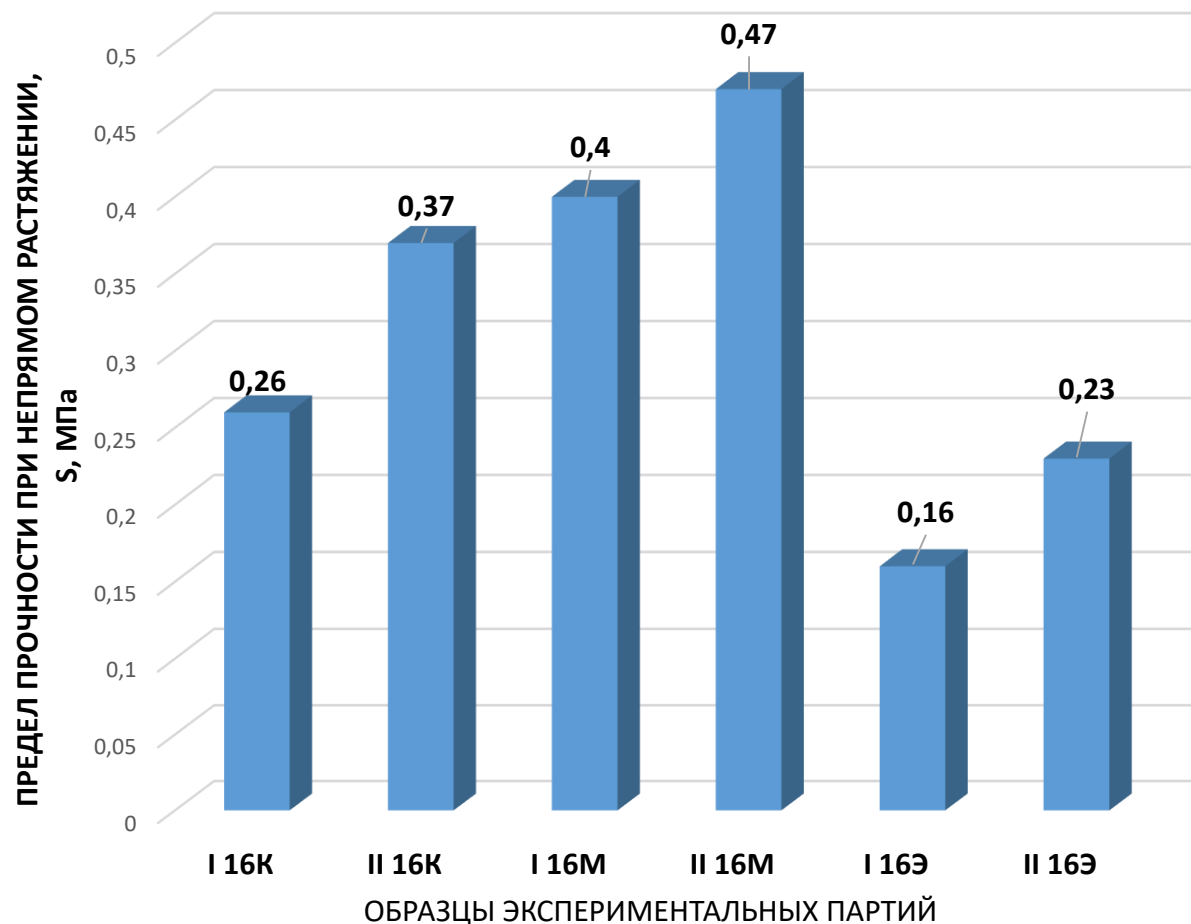
$$\begin{aligned} R_{p.сух.}(\text{МПа}) \\ = 0,32 + 0,118(\text{ПЦ}) \\ - 0,038(\text{ПЦ})(\text{БЭ}) - 0,049(\text{БЭ})^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{p.влаж.}(\text{МПа}) = \\ = 0,216 + 0,093(\text{ПЦ}) - 0,023(\text{БЭ}) \\ - 0,037(\text{ПЦ})(\text{БЭ}) - 0,025(\text{БЭ})^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{вдст} \\ = 0,698 + 0,053(\text{ПЦ}) - 0,058(\text{БЭ}) \\ - 0,073(\text{ПЦ})^2 + 0,031(\text{БЭ})^2 \end{aligned}$$

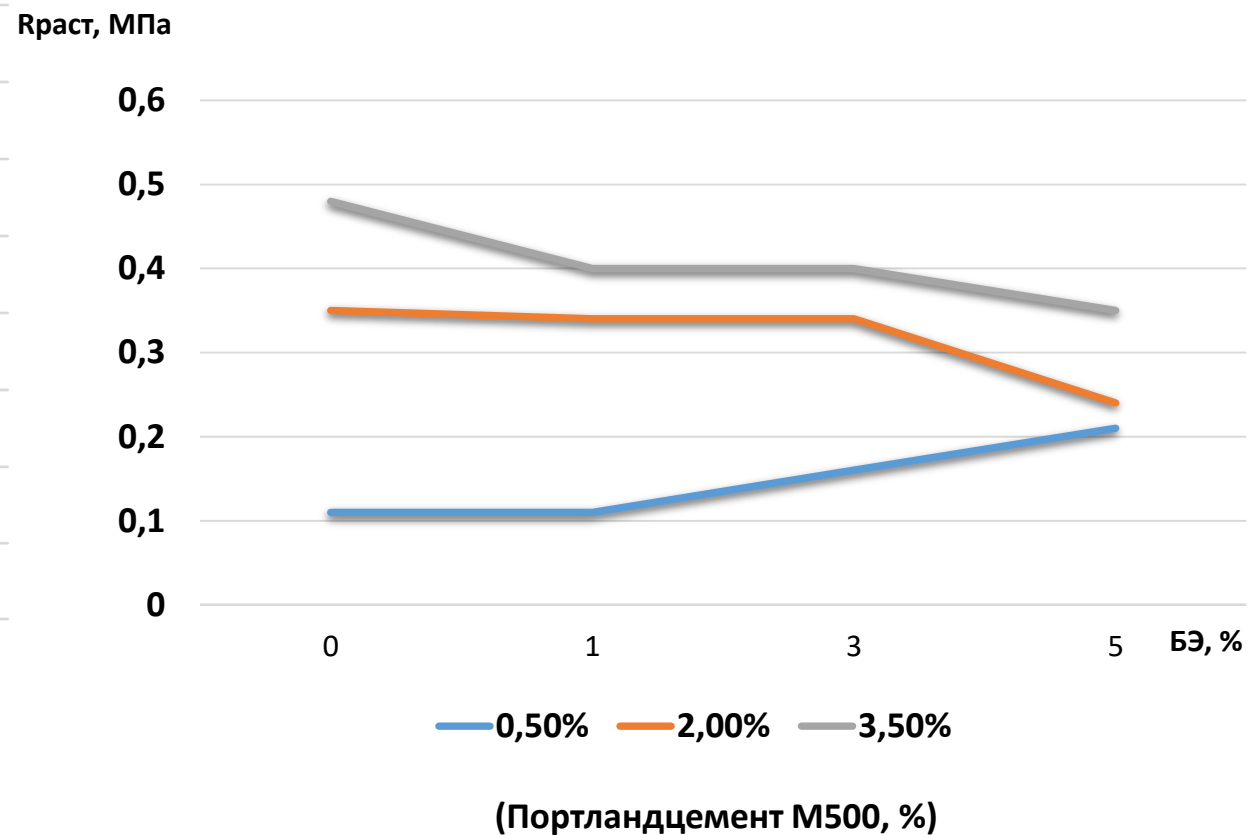


Влияние содержания битумной эмульсии и цемента на прочность образцов АГБС



Зависимость прочности $R_{раст}$ (МПа) от гранулометрического состава и вида вяжущего в АГБ

Зависимость прочности АГБ ($R_{раст}$, МПа) от содержания битумной эмульсии и цемента





ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Наиболее высокими прочностными показателями обладают образцы на основе минерального вяжущего за счет связей преимущественно кристаллического типа.
- Экспериментальные образцы на основе комплексных вяжущих имеют высокие показатели водостойкости, при этом показатели прочности несколько уступают материалам на основе портландцемента. Высокие прочностные показатели обусловлены кристаллической структурой гидратированного портландцемента в комплексном вяжущем.
- Применение только битумной эмульсии в качестве вяжущего не обеспечивает формирование материалов с необходимыми показателями прочности и водостойкости. Структура связей преимущественно «точечная» коагуляционного типа.
- В результате проведенных исследований было установлено, что вид вяжущего и гранулометрический состав оказывают существенное влияние на физико-механические показатели материалов. Материалы, имеющие более тонкий гранулометрический состав, обладают наилучшими показателями прочности при непрямом растяжении.
- Отмечается особое значение цемента в процессах структурообразования АГБС. Установлено, что при малом содержании цемента или его отсутствии прочность получаемых материалов крайне низкая.
- При подборе оптимальных составов асфальтогранулобетонных смесей для условий эксплуатации зоны II₁ следует использовать минеральные или комплексные виды вяжущих, а также добавки, способствующие образованию плотных и водостойких структур.



Спасибо за внимание!