

Посмотрите обсуждения, статистику и профили авторов этой публикации на сайте: [https://www.researchgate.net/publication/283006995](https://www.researchgate.net/publication/283006995_Characterization_of_Recycled_Asphalt_Pavement_RAP_for_Use_in_Flexible_Pavement?enrichId=rgreq-51edee6c7b742cc1fbafb2478cf17842-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MzAwNjk5NTtBUzo0NTY4NjQxNDkzMTU1ODRAMTQ4NTkzNjMwOTEwNA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf)

Характеристика переработанного асфальтового покрытия (RAP) для использования в гибких дорожных покрытиях

**Статья - февраль 2015 г.**

DOI: 10.3844/ajeassp.2015.233.248

Цитаты

20

Читатели

2,393

**2 автора,** в том числе:

Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty 

Менуфийский университет

**46** ПУБЛИКАЦИИ **574** ЦИТАТЫ

Профиль

**Некоторые из авторов данной публикации также работают над этими смежными проектами:**

Моделирование процента задержки строительных проектов в Египте с помощью статистико-нечеткого подхода [View project](https://www.researchgate.net/project/Modeling-Delay-Percentage-of-Construction-Projects-in-Egypt-Using-Statistical-Fuzzy-Approach?enrichId=rgreq-51edee6c7b742cc1fbafb2478cf17842-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MzAwNjk5NTtBUzo0NTY4NjQxNDkzMTU1ODRAMTQ4NTkzNjMwOTEwNA%3D%3D&el=1_x_9&_esc=publicationCoverPdf)



Использование наноматериалов и добавок для улучшения качества горячего асфальта [View project](https://www.researchgate.net/project/Using-of-Nano-Materials-and-Additives-to-Enhance-the-Hot-Mix-Asphalt?enrichId=rgreq-51edee6c7b742cc1fbafb2478cf17842-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MzAwNjk5NTtBUzo0NTY4NjQxNDkzMTU1ODRAMTQ4NTkzNjMwOTEwNA%3D%3D&el=1_x_9&_esc=publicationCoverPdf)

Все содержимое этой страницы было загружено Ахмед Эбрахим Абу Эль-Маати 01 февраля 2017 г.

Пользователь запросил улучшение загруженного файла.

*Название журнала*

Оригинальная исследовательская работа

**Характеристика переработанного асфальтового покрытия (RAP) для использования в гибких дорожных покрытиях**

#### Ахмед Эбрахим Абу Эль-Маати, Абдулла Ибрагим Эльмохр

*1Доценткафедры инженерии автомобильных дорог и аэропортов, Университет Менуфия, Египет*

*2Магистр наук в области строительства автомобильных дорог и аэропортов, инженерный факультет, Университет Алазхар, Египет.*

|  |  |
| --- | --- |
| *История статьи*  Получено: 7 июля 2015 г.  Пересмотрено:28 августа 2015 г.  Принято: 2 сентября 2015 г.  \*Корреспондирующий автор: Ахмед Эбрахим Абу Эль-Маати, кафедра гражданского строительства, Университет Менуфия, Египет; Email: [maaty5000@yahoo.com](mailto:maaty5000@yahoo.com) | **Аннотация:** По экономическим причинам и в связи с необходимостью сохранения окружающей среды в строительстве дорожных покрытий все большее распространение получает использование вторичных асфальтобетонных материалов (RAP). Большинство смесей HMA в Египте производится только из первичных материалов, хотя около 4 миллионов тонн в год регенерированных асфальтовых материалов из-за непрерывных процессов фрезерования или соскабливания дорожного покрытия не используются. Высокий потенциал долговечности обычно подразумевает, что механическое поведение смеси будет сохраняться в течение длительного срока службы. В настоящее время все большее применение находят гибкие дорожные покрытия, изготовленные из горячего асфальта (HMA) с добавлением гранул восстановленного асфальта на центральной асфальт смесительной установке. Основная цель данной работы - исследовать использование однородного восстановленного асфальтобетона в дорожном строительстве, оценив влияние частичной и полной замены заполнителей на RAP на механические и прочностные характеристики плотных смесей HMA. Характеристики смесей на основе ПМП оценивались с помощью серии лабораторных испытаний, включая испытание по Маршаллу, непрямое испытание на прочность при растяжении, испытание на адгезию гранул и системы испытаний материалов. Ряд вяжущих смесей, содержащих различное процентное содержание ПМП, был разработан и подвергнут различным периодам кондиционирования влажности (1, 3 и 7 дней) для изучения влияния влажности на смеси ПМП. Результаты лабораторных исследований показали, что при правильном проектировании асфальтобетонные смеси с RAP, особенно при соотношении замены от 50% до 100%, имеют лучшие характеристики по сравнению с новыми традиционными смесями HMA, что позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду за счет снижения энергопотребления, улучшить механические свойства, долговечность и устойчивость к разрушению.  **Ключевые слова:** Переработанный асфальт; механические свойства; долговечность; прочность на разрыв; системы испытания материалов. |

# Введение

При нагревании битумного вяжущего, заполнителей и производстве огромного количества горячей асфальтовой смеси (ГАС) выделяется значительное количество парниковых газов и вредных загрязняющих веществ. Количество выбросов увеличивается в два раза на каждые 10ºC увеличения температуры производства смеси, и все чаще для производства ГМА с модифицированными вяжущими используется более высокая температура. Также существует проблема нехватки заполнителей, что вынуждает транспортировать материалы на большие расстояния. Использование

дизельного топлива для работы грузовиков приводит к выбросу загрязняющих веществ. Поэтому необходимо попытаться разработать и внедрить альтернативные технологии строительства и содержания дорог для снижения потребления топлива и заполнителей (Anil et al., 2013 и Vislavicius et al., 2013). Рециклинг асфальтобетонных покрытий — это технология, разработанная для реабилитации и/или замены конструкций покрытий, страдающих от постоянной деформации и явных структурных повреждений. В этом контексте, согласно (Reyes et al. 2012), восстановленное асфальтовое покрытие (RAP) является одним из наиболее перерабатываемых материалов в мире. Первые документально подтвержденные данные об использовании ПМП в строительстве

новых дорог датируется 1915 годом. Однако фактическое развитие и рост использования ПДП произошли в 1970-х годах во время нефтяного кризиса, когда стоимость асфальтового вяжущего (или асфальта), а также дефицит заполнителей были высоки вблизи строительных площадок. Позже, в 1997 году, после адаптации Киотского протокола сторонами и его реализации в 2005 году, рециклинг получил большое внимание и более широкое применение в дорожно-строительной отрасли. RAP считается одним из важнейших видов "зеленого" асфальтового покрытия; покрытие, которое минимизирует воздействие на окружающую среду за счет сокращения потребления энергии, природных ресурсов и сопутствующих выбросов при соблюдении всех эксплуатационных условий и стандартов. В соответствии с принципами устойчивого развития, устойчивое развитие определяется как удовлетворение потребностей настоящего времени без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности (Chen et al., 2009).

# Факторы окружающей среды, влияющие на характеристики HMA

Факторы окружающей среды, такие как температура, воздух и вода, могут оказывать значительное влияние на долговечность асфальтобетонных смесей. В мягких климатических условиях, когда имеются качественные заполнители и асфальтобетонный цемент, основной вклад в ухудшение качества может вносить транспортная нагрузка, а возникающие в результате этого разрушения проявляются в виде усталостных трещин, колейности (постоянной деформации) и гравия. Однако, когда речь идет о суровом климате, эти нагрузки возрастают при использовании некачественных материалов, при недостаточном контроле, при движении транспорта, а также при воздействии воды, которые являются ключевыми элементами в деградации асфальтобетонных покрытий. Вода вызывает потерю адгезии на границе раздела битум-агрегат. Это преждевременное разрушение адгезии обычно называют отслоением в асфальтобетонных покрытиях. Прочность снижается, поскольку смесь перестает действовать как целостная структурная единица. Потеря адгезии делает бесполезным когезионное сопротивление меж зернового битумного тела. Вода может проникать на границу раздела посредством диффузии через битумные пленки и непосредственно в частично покрытый заполнитель. Вода может вызывать разрушение по пяти различным механизмам, таким как отслоение, вытеснение, спонтанная эмульгация, поровое давление и гидравлический размыв (Gorkem et al., 2009).

Асфальтобетонные смеси предназначены в первую очередь для обеспечения стабильности и долговечности (Al-Abdul Wahhab et al., 1998). Наиболее серьезным последствием вскрытия является потеря прочности и целостности дорожного покрытия.В процессе развития вскрытие может принимать различные формы. Однако вскрыша на конкретном участке может быть достаточно сильной, прежде чем появятся какие-либо поверхностные индикаторы. Поверхностные индикаторы могут включать колейность, толчки и/или трещины. Одной из основных причин разрушения гибких дорожных покрытий и ухудшения эксплуатационных свойств дорог является низкий потенциал долговечности изнашиваемых и связующих слоев асфальтобетона. Потенциал долговечности битумных смесей можно определить как устойчивость смеси к постоянному и комбинированному разрушающему воздействию воды и температуры. Высокий потенциал долговечности обычно подразумевает, что механическое поведение смеси будет сохраняться в течение длительного срока службы (Kanitpong et al., 2006). Длительный срок службы является приблизительным синонимом долговечности, но существует несколько определений слова "долговечность". В стандартах, подготовленных комитетом ASTM E-6 по эксплуатационным характеристикам строительных конструкций, даны следующие определения долговечности и определение родственного понятия - работоспособности (Moghadas et al., 2012).

Долговечность: Безопасная работа конструкции или части конструкции в течение расчетного срока службы (ASTM рекомендует практику повышения долговечности строительных конструкций против повреждений, вызванных водой (E241-77)).

Долговечность: Способность сохранять работоспособность изделия, компонента, узла или конструкции в течение определенного времени (из рекомендуемой практики ASTM E632).

Работоспособность: Способность строительного изделия, компонента, узла или конструкции выполнять функции, для которых они спроектированы и изготовлены (из рекомендуемой ASTM практики E632).

# Переработанное асфальтовое покрытие

В США Федеральная администрация шоссейных дорог (FHWA) сообщила, что 73 из 91 миллиона тонн асфальтового покрытия, снимаемого ежегодно в ходе проектов по восстановлению и расширению дорог, повторно используются для строительства новых дорог, дорожного полотна, обочин и насыпей (FHWA, 2002). Повторное использование существующих асфальтовых покрытий позволяет получить новые покрытия со значительной экономией материалов, затрат и энергии. Более того, было установлено, что смеси, содержащие восстановленный асфальтобетон (RAP), по своим эксплуатационным характеристикам не уступают первичным смесям. В отчете Национальной программы исследований автодорог сотрудничества (NCHRP) представлены основные концепции и рекомендации относительно компонентов смесей, включая новый заполнитель и материалы RAP (NCHRP, 2001). Некоторые авторы утверждают

что для рециклинга асфальтобетонных покрытий подходят различные методы, включая: горячий рециклинг на заводе, горячий рециклинг "in situ", холодный рециклинг "in situ" и другие. Тем не менее, горячий рециклинг является одним из наиболее широко используемых в настоящее время методов, при котором первичные материалы и RAP комбинируются в различных пропорциях и размерах (Miro et al., 2011). Исследования, проведенные в Европе и США, показали, что более 80% рециклированного материала повторно используется при строительстве дорог, но правила все еще строги и позволяют включать RAP в пропорции от 5 до 50% для производства новых горячих асфальтобетонных смесей (HMA) (Mengqi et al., 2012). Недавние исследования (Celauro et al., 2010; Shirodkar et al. 2011) показали, что замена RAP в пропорциях выше 50% является целесообразной для производства новых смесей HMA, обеспечивая удовлетворительные результаты механических свойств. Аналогичным образом, восприимчивость к разрушению под воздействием влаги была низкой (коэффициент прочности на разрыв (TSR) приближался к 95%). Кроме того, в смесях HMA с заменой RAP на 50% увеличилась прочность при непрямом растяжении (ITS) по сравнению со смесями HMA, изготовленными из первичных материалов. Энергия, рассеиваемая во время испытания ITS, также увеличилась на 100% в смесях HMA с заменой RAP.

Некоторые исследования показали, что использование определенного процента RAP повышает эксплуатационные свойства смесей, например (Feipeng et al. 2009 и Saad et al. 2014), а некоторые исследования показали, что при использовании определенного процента RAP нет значительных изменений в эксплуатационных свойствах смесей (Paul, 1996). Некоторые исследователи обнаружили, что переработанные смеси обладают хорошей устойчивостью к повреждению от влаги при низком процентном содержании RAP, в то время как значительного увеличения устойчивости к повреждению от влаги при увеличении процентного содержания RAP в смеси не наблюдается (Baron et al. 2012), а некоторые исследования показали, что устойчивость к повреждению от влаги значительно снижается при наличии RAP (Huang et al., 2010). Некоторые исследователи обнаружили, что присутствие RAP увеличивает жесткость смеси (Aravind et al., 2006 и AL-Zubaidi et al., 2014) и уменьшает, согласно некоторым исследованиям (Huang et al, 2010). Аналогично, усталостная прочность увеличивается по данным (Tabakovi et al., 2010) и уменьшается по данным (Mohammed et. al., 2003) и изменяется в зависимости от температуры (Puttaguanta et al., 1997). Прочность на разрыв увеличивается (Sarsam et al., 2014) или аналогична первичной смеси (Katman et al. 2012). Основываясь на положительном опыте и результатах использования во всем мире смесей HMA с включением RAP, можно сделать вывод, что соответствующие результаты могут быть получены при применении

этой технологии в развивающихся странах, таких как Египет, где не используется около 4 миллионов тонн в год регенерированных асфальтовых материалов. В этой связи необходимо провести исследовательские проекты и получить финансовую поддержку для продвижения в разработке осуществимых альтернатив, которые будут менее инвазивными для окружающей среды и практичными в использовании для строителей и практиков.

# Постановка проблемы и цели

В последнее время во всем мире стремятся использовать зеленый асфальт, и одним из важных способов использования зеленого асфальта является восстановленное асфальтовое покрытие. Например, в Египте производится около 4 миллионов тонн в год восстановленного асфальтового покрытия, которое не используется. Вопрос заключается в том, что, если бы эти материалы RAP были переработаны в смеси HMA, как этот процесс повлияет на механические и прочностные характеристики асфальтовых смесей, и какой процент RAP можно использовать в смеси, чтобы получить максимальные преимущества. Ответы на эти вопросы являются основной целью данного исследования.

# Экспериментальная программа и процедуры

## Материалы

### Натуральные агрегаты

Были использованы крупные заполнители (25/9,5) мм и (12,5/2,36) мм, а также песок (проход 4,75 мм) из отбойного устройства Amal в Атаке, полученный из доломитовых заполнителей, в то время как природный песок (проход 4,75 мм) из гнезда в Кафер Давуд и пылевидный цемент с цементных заводов Хелвана. Кривая градации используемых природных заполнителей показана на рис.1. Свойства природных заполнителей приведены в таблице 1.

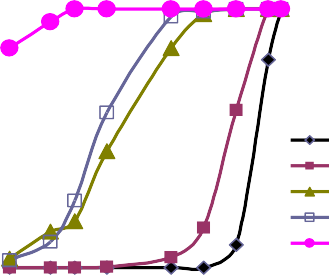
### Асфальтовый цемент

В данном исследовании использовался асфальтовый цемент (AC 60/70), полученный из Victory Laboratory в Суэце. В таблице 2 приведены физические свойства этого асфальта в соответствии со спецификациями ASTM.

### Переработка асфальтового покрытия

Было использовано восстановленное асфальтовое покрытие (RAP), взятое с сельскохозяйственной дороги Каир - Александрия, на участке [175 + 400], правого направления. Образец восстановленного асфальтового покрытия был взят путем фрезерования дороги примерно на пять сантиметров фрезой. С помощью экстракционного оборудования образец содержит 4,13 % битума. Образец рециклируемого асфальтового покрытия показан на рис. 2.

**120 120**



**(25/9,5) мм (12,5/2,36) мм**

**Разбивочный песок Природный песок Пыль цементная**



**Мин.**

**Макс.**

**Проектная кривая**

**100**

**80**

**%**

**60**

**Переход**

**40**

**20**

**0**

**0.01**

**0.1 1**

**10 100**

**1000**

**100**

**% прохода**

**80**

**60**

**40**

**20**

**0**

**Размер сита (мм)**

Рис.1. Градация для природных заполнителей

Таблица 1. Физико-механические свойства из природных заполнителей

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Описание | Значение | |
| (25/9.5) мм | (12.5/2.36) мм |
| Объемный вес | 1.43 т/м3 | 1.45 т/м3 |
| Удельный вес | 2.56 | 2.54 |
| % Поглощения | 1.88 | 1.94 |
| Коэффициент дробления | 21.0 % | 22.0 % |



Рис. 2. Образец рециклируемого асфальтового покрытия

**0.01 0.1 1 10 100**

**Размер сита (мм)**

Рис. 3. Конструкция смеси для асфальтобетонного покрытия (3d)

# Лабораторные тесты

### Изготовление смесей HMA

Пять различных соотношений битума (3,5%-5,5%) были подготовлены с увеличением на 0,5% для определения оптимального содержания битума для каждой смеси ПМП. Образцы Маршалла, подготовленные в соответствии с AASHTO T 245, были уплотнены при 75 ударах по каждой грани с помощью катка Маршалла. Образцы нагружались до разрушения при постоянной скорости сжатия 1,65 мм/мин. Рассчитывалось отношение устойчивости к расходу, называемое коэффициентом Маршалла (MQ) и являющееся показателем жесткости смесей. Хорошо известно, что MQ является мерой устойчивости материала к сдвиговым напряжениям, постоянной деформации и, следовательно, образованию колеи. Высокие значения MQ указывают на высокую жесткость смеси с большей способностью распределять приложенную нагрузку и устойчивостью к деформации ползучести. Для определения устойчивости смесей к разрушению под воздействием влаги была получена сохраняемая устойчивость Маршалла (RMS) путем использования средней устойчивости по следующему уравнению 1 (Paul et al., 1996.):

# Дизайн смеси

Где:

RMS = 100 (MScond/MSuncond) Eq. 1

Проектирование смесей для первичных и RAP смесей было выполнено в соответствии с египетскими спецификациями с использованием 38% от (25/9,5) мм, 32% от (12,5 мм / 2,36) мм, 14% от разрушающего песка, 14% от природного песка и 2% от пылевидного цемента. Пять плотных смесей горячей асфальтобетонной смеси с долей вторичного асфальтового покрытия 0%, 25%, 50%, 75% и 100% были разработаны на основе египетских спецификаций вяжущего слоя (3d), как показано на рис. 3.

RMS это сохраненная стабильность Маршалла;

MScond средняя устойчивость по Маршаллу для кондиционных образцов (кН);

MSuncond средняя устойчивость по Маршаллу для некондиционных образцов (кН).

Индекс сохраняемой стабильности может быть использован для измерения восприимчивости тестируемой смеси к влаге.

### Кондиционирование влаги

Присутствие воды в асфальтовом покрытии неизбежно. Присутствие воды в асфальтовом покрытии может быть вызвано несколькими причинами. Вода может просачиваться в дорожное покрытие с поверхности через трещины в покрытии, через взаимосвязь воздушных пустот

факторы окружающей среды, строительства и конструкции дорожного покрытия; распределение внутренней структуры, а также качество и тип материалов, используемых в асфальтовой смеси. Восприимчивость к влаге уплотненных образцов оценивалась по коэффициенту прочности при растяжении (TSR) с помощью уравнения 3.

системы или трещин, снизу из-за повышения уровня грунтовых вод или с боков. Недостаточная сушка заполнителя в процессе смешивания может также привести к присутствию воды в дорожном покрытии.

*TSR* 

Где:

*ITScond ITSuncond*

Eq. 3

Определение влажности используется для оценки влияния водонасыщения уплотненных битумных смесей в лабораторных условиях. Тем не менее, почти все исследования были направлены на сравнительную оценку повреждения от влаги, либо через визуальные наблюдения на основе полевых данных или лабораторных испытаний, либо через механические испытания "мокрый против сухого" для получения так называемого параметра индекса повреждения от влаги (Ozen et al., 2011; Moghadas et al. 2012). В данном исследовании кондиционирование влажности использовалось для оценки влияния повреждения водой на долговечность уплотненных битумных смесей, содержащих ПДП, в лабораторных условиях. Кондиционирование образцов горячей асфальтовой смеси проводилось в соответствии с AASHTO T283 путем погружения образцов в воду при температуре 60±1°C на различные периоды обработки (1, 3 и 7 дней) и последующего помещения в водяную баню при 25°C на 2 часа.

### Косвенное испытание на растяжение

Устойчивость асфальтобетонных смесей к вскрытию оценивается по снижению потери прочности при непрямом растяжении (ITS). Испытание на косвенную прочность при растяжении в соответствии с (ASTM D 6931) проводилось на цилиндрических образцах, которые подвергались сжимающей нагрузке, действующей параллельно вертикальной диаметральной плоскости с помощью нагрузочного оборудования Marshall. Этот тип нагрузки создает относительно равномерное растягивающее напряжение, которое действует перпендикулярно плоскости приложенной нагрузки, и образец обычно разрушается, раскалываясь вдоль плоскости нагрузки. Для каждого процента смеси (RAP) было подготовлено пять образцов с оптимальным содержанием битума. Прочность образцов на непрямое растяжение определялась по следующему уравнению 2:

*ITS*  2000  *P*

ITScond средняя прочность на непрямое растяжение для

обусловленного образца;

ITSuncond средняя прочность на непрямое растяжение сухого (некондиционного) образца.

### Испытание на адгезию гранул

Данное испытание предназначено для оценки устойчивости к истиранию поверхности обнаруживаемого предупредительного

/направляющей поверхности. Результаты испытания используются для определения того, насколько хорошо образец HMA сохраняет свою форму в течение полезного срока службы. Испытательная машина показана на рис. 4. Для данного испытания было подготовлено пять образцов, для пятипроцентных долей RAP, размером приблизительно (200\*50\*50) мм, как показано на рис. 5. Испытание проводилось в соответствии с ASTM D 4977. Каждый образец был помещен под проволочную щетку весом 25 фунтов. Затем щетка была проведена 50 раз взад и вперед по поверхности. Это создавало поверхностный износ, который измерялся для определения уровня устойчивости к истиранию на основе веса образца.

Где:

  *H*  *D*

Eq. 2

ITS косвенная прочность на растяжение (кПа);

P максимальная нагрузка до разрушения (Н);

h толщина образца (мм);

D диаметр образца (мм).

Уровень и степень повреждения от влаги, также называемые восприимчивостью к влаге, зависят от

Рис. 4. Машина для испытания адгезии



Рис. 5. Пять образцов машины для испытания адгезии

### Системы испытания материалов (MTS)

Машина для систем испытания материалов, показанная на рис. 6, предоставляет широкий спектр возможностей для статических и динамических испытаний с низкой и высокой силой. Выбирая из множества значений силы, номинального расхода серво клапана, производительности насоса, программного обеспечения и аксессуаров, напольную систему 810 можно легко настроить для удовлетворения конкретных потребностей в испытаниях материалов или компонентов, таких как (растяжение, изгиб, прочность, высоко цикловая усталость, малоцикловое усталостное сжатие, ползучесть, рост усталостных трещин, вязкость разрушения). В данной работе машина системы испытания материалов использовалась для получения зависимости между осевой нагрузкой и соответствующим осевым смещением для оценки поведения смесей RAP при осевых нагрузках.



Рис. 6. Машина для систем испытания материалов

# Результаты и обсуждение

## Результаты испытаний Маршалла

Механические свойства, включая стабильность, текучесть и коэффициент Маршалла, показаны на рис. 7, 8 и 9, где показан дизайн смеси Маршалла для HMA, содержащей RAP, и соответствующее оптимальное содержание вяжущего (OBC). OBC для каждой смеси RAP составляет 4,5%, 4,58%, 4,13%, 4,5% и 5,5% для содержания RAP 0,0%,

25%, 50%, 75% и 100% соответственно. Результаты, усредненные по трем образцам, показывают, что OBC изменяется в зависимости от процентного содержания (RAP), где самое низкое значение OBC обеспечивается при 50% RAP, в то время как самое высокое значение достигается при 100% RAP. OBC увеличивается примерно на 2% при увеличении содержания RAP с 0% до 25% и примерно на 22% при увеличении содержания RAP с 0% до 100%.

Результаты, показанные на рис. 7, иллюстрируют, что процентное содержание RAP играет значительную роль в механических свойствах битумных смесей, где смесь со 100% RAP достигает максимальной стабильности. Значение текучести, как показано на рис. 8, уменьшается с увеличением соотношения RAP, где все значения текучести находятся в пределах требуемого диапазона (от 2 до 4 мм в соответствии с Египетским кодексом), за исключением смеси, содержащей 100% RAP при содержании битума 4,13 %. Как показано на рис. 9, коэффициент Маршалла (MQ) контрольной смеси немного увеличивается при содержании битума от 3,5 % до 4 %, после чего немного уменьшается при содержании битума до 5,5 %, в то время как MQ смеси с ПМП увеличивается, а затем резко уменьшается при увеличении содержания битума. На основании результатов испытаний по Маршаллу, рассмотренных ранее, оптимальное содержание RAP 100% рекомендуется для получения наибольшей стабильности и коэффициента Маршалла. Изменения механических свойств смесей с ПМП при оптимальном содержании битума показаны на рис. 10-12. Видно, что добавление 100% RAP оказывает большое влияние на жесткость смеси. Можно сделать вывод о значительном улучшении характеристик жесткости ХМА после добавления ПМП.

**Устойчивость маршала (кг)**

2100

**1500**

**1400**

**1399.57**

1900

**Стабильность (кг) Стабильность (кг) (кг)**

1700

**0% RAP**

**25% RAP**



**1300 1279.85**

**1200**

1500

1300

1100

900

**50% RAP2**

**75% RAP**

**100% RAP**

**1100**

**1000**

**900**

**800**

**1088.66**

**1036.99**

**990.216**

700

3 3.5 4 4.5 5 5.5

**Содержание битума %**

**0% 25% 50% 75% 100%**

**Процент ПДП**

4.5

4

**Поток (мм)**

3.5

3

2.5

2

1.5

Рис. 7. Стабильность при содержании битума



3 3.5 4 4.5 5 5.5

**Содержание битума%**

Рис. 8. Поток с различным содержанием битума

**0% RAP**

**25% RAP**

**50% RAP2**

**75% RAP**

**100% RAP**

Рис.10. Значения стабильности при оптимальном содержании

**4**

**Поток Маршалла (мм)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **3.76** | | | | | | | | | | |
|  |  |  | | | | | | | | |
|  | **3.26 3.3** | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | |
|  |  |  | | | | |  |  |
|  |  |  | | | | |  |
|  |  | **2.8** | | | | |  |
|  |  |  |  | **2.6** | | |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |

**3.8**

**3.6**

**3.4**

**3.2**

**3**

**2.8**

**2.6**

**2.4**

**2.2**

**2**

**0% 25% 50% 75% 100%**

**Процент ПДП**

Рис. 11. Значения расхода при оптимальном содержании

**Коэффициент Маршала (кг/мм)**

1000

900

**Коэффициент Маршалла (кг/мм)**

800

700

600

500

400

300

200

3 3.5 4 4.5 5 5.5

**Содержание битума%**

**0% RAP**

**25% RAP**

**50% RAP2**

**75% RAP**

**100% RAP**

**440**

**420**

**400**

**380**

**360**

**340**

**320**

**300**

**344.62**

**340.38**

**370.35**

**380.85**

**424.11**

**0% 25% 50% 75% 100%**

**Процент ПДП**

Рис. 9. Коэффициент Маршалла при различном содержании битума

Рис.12. Значения коэффициента Маршалла при оптимальном содержании битума

### Влияние повреждения влагой на коэффициент Маршалла

Как показано на рис.13, коэффициент Маршалла (жесткость) уменьшается с увеличением периода погружения. Содержание RAP в смесях HMA оказывает незначительное влияние на коэффициент Маршалла. Это влияние может быть связано с уменьшением обрабатываемости, что снижает асфальт

покрытие зерен заполнителя и заполнение микропор асфальтом, в результате чего плотность смеси уменьшается, что позволяет увеличить потоки.

450



На рис.14 показана зависимость между периодами погружения смесей RAP и значениями RMS. Результаты являются средними по трем образцам. Можно заметить, что при увеличении периода погружения потенциал долговечности снижается. Наибольшее значение RMS получено при 50% соотношении RAP, в то время как смеси со 100% RAP имеют наименьшее значение RMS для всех исследованных периодов погружения.

**Жесткость (кг/мм)**

400

350

300

250

0% RAP

25% RAP

50% RAP

75% RAP

100% RAP

RMS смесей RAP до 50% находятся в пределах египетской спецификации (более 75%). Этот результат означает, что добавление 50% RAP в HMA обеспечивает лучшую прочность и более длительный срок службы дорожного покрытия.

**85**



200 **80**

**Retained Marshall stability (%)**

150 **75**

100

0 1 3 7 **70**

**0% RAP**

**25% RAP**

**50% RAP**

**75% RAP**

**100% RAP**

**Период погружения (дни) 65**

Рис.13. Влияние времени погружения на коэффициент **60**

В таблице 3 показано влияние зачистки на коэффициент вариации жесткости для всех смесей. Можно заметить, что после периода погружения в течение одного дня смесь, содержащая 50% RAP, достигает минимальной потери коэффициента Маршалла, где это изменение меньше, чем у контрольной смеси примерно на 4,9%. После периодов погружения 3 и 7 дней минимальные потери жесткости получены у контрольной смеси и смеси с 25% RAP соответственно.

Таблица 3. Влияние кондиционирования на соотношение потерь жесткости смесей

**55**

**50**

**1 3 7**

**Период погружения (дни)**

Рис.14. Устойчивость по Маршаллу смесей с ПМП

## Результаты испытаний на непрямое растяжение

Результаты непрямой прочности при растяжении (ITS) сухих смесей HMA для каждого соотношения RAP показаны на рис.15. Заметно, что добавление RAP в HMA улучшает показатели прочности при растяжении по сравнению с контрольной смесью примерно на 6, 106, 82 и 81 % для 25%, 50%, 75% и 100% соотношения RAP соответственно. Наибольшее значение достигается при 50% содержании ПМП. Таким образом, можно сделать вывод, что смесь, содержащая 50% RAP, приобретает желаемую прочность по сравнению с смесями.

**16**



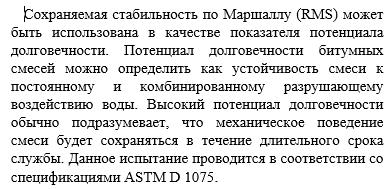
**14**

**Indirect tensile strength (kg/cm2)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Кондиции периоды (дни) | RAP содержание (%) | | | | |
| 0 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 1 | 26.66 | 28.31 | 25.35 | 40 | 42.94 |
| 3 | 45.40 | 46.14 | 46.82 | 60.63 | 60.73 |
| 7 | 54.52 | 52.60 | 68.08 | 70.54 | 67.08 |

**12**

### Сохраненная стабильность Маршалла **10**

 **8**

**6**

**4**

**2**

**0**

**0**

**0% RAP**

**25% RAP**

**50% RAP**

**75% RAP**

**100% RAP**

**1 3 7**

**Период погружения (дни)**

Рис.15. Прочность при растяжении

### Влияние на прочность при непрямом растяжении

Косвенное испытание на растяжение измеряет изменение значения прочности при растяжении, полученное после насыщения и ускоренного кондиционирования водой уплотненного HMA в лаборатории. Результаты используются для прогнозирования долгосрочной восприимчивости битумных смесей к разрушению. Рис. 15 иллюстрирует влияние периода погружения на значения ITS, где можно заметить, что после периодов погружения в 1, 3 и 7 дней смеси, содержащие 50, 75 и 100% RAP, очевидно, обеспечивают более высокий ITS по сравнению с контрольной смесью. Таким образом, можно сделать вывод, что добавление 50% RAP в смеси HMA обеспечивает максимальное улучшение прочности на растяжение после всех исследованных периодов кондиционирования.

**Коэффициент растяжимости (%)**

**0.4**

**0.35**

**0.3**

**0.25**

**0.2**

**0.15**

**0.1**

**0.05**

**0**

**0% RAP**

**25% RAP**



**50% RAP**

**75% RAP**

**100% RAP**

**1 3 7**

**Период погружения (дни)**

Рис.16. Коэффициент прочности смесей с RAP

### Коэффициент прочности на разрыв

Коэффициент прочности при растяжении (TSR) используется для прогнозирования восприимчивости смесей к влаге. Данное испытание проводится в соответствии со спецификациями ASTM D 4867. Подготовленные образцы были разделены на два подмножества, одно подмножество поддерживается в сухом состоянии, а другое - в частично насыщенном водой состоянии. Потенциал повреждения от влаги определяется отношением прочности на разрыв влажного образца к прочности на разрыв сухого образца. Согласно предыдущим исследованиям, таким как (Feipeng et al. 2009) TSR 0,8 через 1 день обычно используется в качестве минимально приемлемого значения для горячего асфальта.

Смеси с коэффициентом растяжимости менее 0,8 восприимчивы к влаге, а смеси с коэффициентом более 0,8 относительно устойчивы к повреждению влагой.

Модуль упругости асфальтовых смесей является наиболее популярной формой измерения напряжения-деформации, используемой для оценки упругих свойств. Хорошо известно, что большинство материалов для укладки не являются упругими, а испытывают некоторую постоянную деформацию после каждого приложения нагрузки. Однако если нагрузка мала по сравнению с прочностью материала и повторяется большое количество раз, то деформация при каждом повторении нагрузки почти полностью восстанавливается и пропорциональна нагрузке и может считаться упругой. С этой целью было проведено испытание на растяжение при многократном нагружении уплотненных битумных смесей в соответствии с ASTM D 7329. Модуль упругости (Mr) может быть рассчитан по максимальной приложенной нагрузке и горизонтальной упругой деформации при растяжении, как показано в следующем уравнении 4 (Katman et al., 2012):



Где:

Контрольная смесь после 1 дня кондиционирования, в то время как все значения TSR не соответствуют спецификации. Через 3 или 7 дней, восприимчивость к влаге HMA улучшается для всех смесей RAP по сравнению с контрольной смесью. Наибольшее значение TSR получено при соотношении 50% RAP, таким образом, добавление 50% RAP в смесь может повысить влагостойкость для всех исследуемых периодов кондиционирования.

### Коэффициент модуля упругости

Модуль упругости материала фактически является оценкой его модуля упругости. В последние годы в проектировании асфальтобетонных покрытий произошла смена философии с более эмпирического подхода на механистический, основанный на теории упругости.

Mr модуль упругости (МПа);

P максимальная приложенная нагрузка (Н);

h толщина образца (мм);

δ восстанавливаемая горизонтальная деформация (мм);

μ коэффициент Пуассона (принимается равным 0,35).

Модуль упругости считается качественным испытанием для оценки серьезности повреждения от влаги, в то время как количественное испытание измеряет параметр прочности. Отношение Мр кондиционированной смеси к Мр сухой смеси называется модулем упругости. Результаты ITS, которые являются средними по трем образцам, показаны на рис.17, где показано, что смеси, содержащие 50, 75 и 100% RAP, обеспечивают явно более высокое увеличение модуля упругости по сравнению с контрольной смесью. Более того, периоды кондиционирования (от 1 до 7 дней) имеют большое и приблизительно одинаковое значение.

влияют на снижение значений модуля упругости. Наибольшее значение Mr достигается при 100% содержании RAP для сухих смесей, в то время как максимальное значение достигается при 50 и 75% содержании RAP для влажных смесей.

**350**



## Системы для испытания материалов

Образцы HMA, содержащие RAP, были помещены в систему испытания материалов (MTS), как показано на рис.19. На рис.20 от (a) до (e) показана зависимость между эффективной нагрузкой и соответствующим осевым смещением для

**300**

**Модуль упругости (Н/мм2)**

**250**

**200**

**150**

**100**

**50**

**0**

**0**

**1 3**

**Период погружения (дни)**

**0% RAP**

**25% RAP**

**50% RAP**

**75% RAP**

**100% RAP**

**7**

Смеси RAP с содержанием от 0,0% до 100% соответственно.

Рис.17. Модуль упругости смесей RAP

## Результаты испытания на адгезию гранул

Из рис. 18 видно, что присутствие RAP в смесях HMA увеличивает прочность сцепления частиц, что приводит к снижению процента потери веса. Наименьшая потеря веса достигается при 100% содержании RAP, где она ниже, чем потеря веса контрольной смеси примерно на 76,53%. Для смесей HMA, содержащих 25%, 50% и 75% RAP, потери веса ниже, чем потери веса контрольной смеси на 16,24%, 32,85%, 52,71% соответственно. Этот результат указывает на то, что смеси, содержащие RAP, обеспечивают хорошие эксплуатационные характеристики в течение всего срока службы по сравнению с контрольной смесью.

**3**

**2.77**

**2.5**

**2.32**

**2**

**1.86**

**1.5**

**1.31**

**1**

**0.65**

**0.5**

**0**

**0%**

**25%**

**50%**

**75%**

**100%**

**Различные проценты RAP (%)**

**30000**

**25000**

**Нагрузка (Н)**

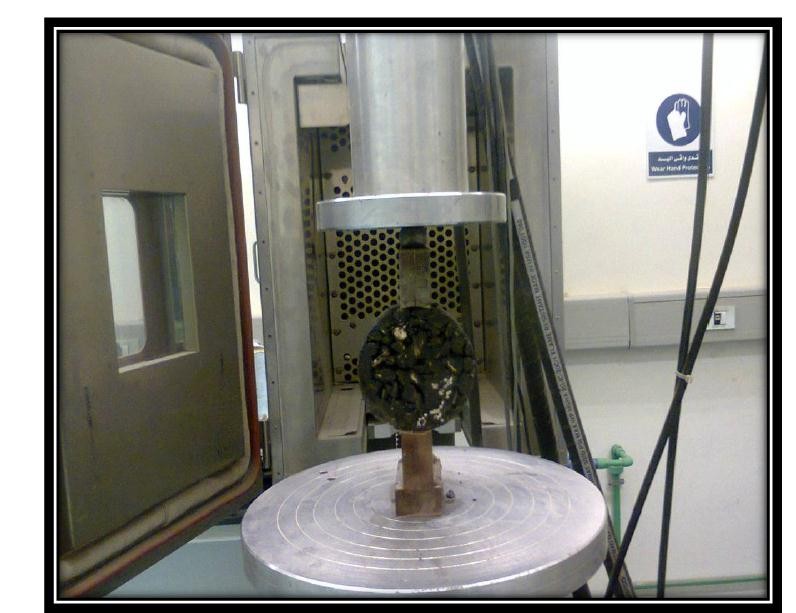
**20000**

**15000**

**10000**

**5000**

**0**

 Рис.19. Образец HMA в машине MTS

**0 1 2 3 4 5 6 7 8 9**

**Осевое смещение (мм)**

1. Control mixture (0.0% RAP)

**30000**

**Нагрузка (Н)**

**Percent loss of weight (%)**

**25000**

**20000**

**15000**

**10000**

**5000**

**0**

**0 1 2 3 4 5 6 7 8 9**

**Осевое смещение (мм)**

1. 25% RAP

Рис. 18. Процентная потеря веса для всех смесей RAP

**40000**

**Нагрузка (Н)**

**35000**

**30000**

**25000**

**20000**

**15000**

**10000**

**5000**

**0**

**12000**

**Нагрузка (Н)**

**10000**

**8000**

**6000**

**4000**

**2000**

**0**

**20000**

**18000**

**Нагрузка (Н)**

**16000**

**14000**

**12000**

**10000**

**8000**

**6000**

**4000**

**2000**

**0**

**0 1 2 3 4 5 6 7 8 9**

**Осевое смещение (мм)**

1. 50% RAP

**0 1 2 3 4 5 6 7 8 9**

**Осевое смещение (мм)**

1. 75% RAP

**0 1 2 3 4 5 6 7 8 9**

**Осевое смещение (мм)**

1. 100% RAP

снижают эксплуатационные характеристики и срок службы дорожных покрытий. Основной целью данного исследования было оценить влияние добавления RAP на механические и прочностные характеристики смесей HMA, чтобы противостоять различным типам разрушений. На основании результатов лабораторных испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Наблюдалось значительное улучшение механических свойств смеси после добавления RAP, где стабильность снизилась примерно на 15, 19 и 22,6 % для 25, 50 и 75 % содержания RAP соответственно, и увеличилась примерно на 10 % для 100 % содержания RAP. В то время как значения текучести уменьшились примерно на 31% при 75% содержании ПМП, а значения коэффициента Маршалла как меры сопротивления жесткости увеличились примерно на 25% при 100% содержании ПМП.
2. Добавление RAP оказало большое влияние на улучшение косвенной прочности при растяжении, где самое высокое значение было достигнуто при 50% содержании RAP при увеличении соотношения примерно на 106% по сравнению с контрольными смесями. Коэффициент прочности при растяжении кондиционированного ХМА был улучшен для всех смесей с ПМП по сравнению с контрольной смесью. Наибольшее значение TSR было получено при 50% RAP, таким образом, добавление 50% RAP в смесь может улучшить восприимчивость к влаге для всех исследуемых периодов кондиционирования.
3. Смеси, содержащие 50, 75 и 100% RAP, обеспечили более высокое увеличение модуля упругости по сравнению с контрольной смесью, где наибольшее значение было достигнуто при 100% содержании RAP для сухих смесей, а при 50 и 75% содержании RAP для влажных смесей. Добавление RAP улучшило устойчивость HMA к разрушению под воздействием влаги, увеличив модуль упругости при всех исследованных периодах кондиционирования.

Рис. 20. Зависимость нагрузки от осевого смещения для всех смесей RAP

Из рис.20 видно, что максимальные нагрузки разрушения или мощности смеси составляют 25, 27,5, 34, 11 и 17,5 кН с соответствующими осевыми

смещениями около 1,8, 2, 2,2, 1,8 и 3 мм для 0,0%,

25%, 50%, 57% и 100% RAP соответственно. Таким образом, смесь с 50% RAP достигает максимальной прочности, в то время как смесь с 75% RAP обеспечивает самую низкую нагрузку разрушения.

# Выводы

Восстановленное асфальтовое покрытие (RAP)

является одним из самых перерабатываемых

материалов в мире. В Египте около 4 миллионов тонн

регенерированных асфальтовых материалов в год не

используются. Более того, многие автомагистрали

подвергаются преждевременным разрушениям,

которые Лучшее соотношение RAP, обеспечивающее максимальную устойчивость составляет 50%

1. Присутствие RAP увеличило прочность сцепления частиц, что привело к снижению процента потери веса. Наименьший процент потери веса был достигнут при 100% содержании ПМП. Таким образом, смеси, содержащие ПМП, обеспечили хорошие эксплуатационные характеристики в течение срока службы по сравнению с контрольной смесью. Более того, смесь с 50% RAP достигла максимальной мощности, в то время как смесь с 75% RAP обеспечила самую низкую нагрузку разрушения.
2. В целом, можно сказать, что RAP является одним из наиболее важных типов зеленого асфальтового покрытия, который во всем мире стремятся использовать, поскольку он минимизирует воздействие на окружающую среду за счет снижения потребления энергии, улучшает механические свойства, долговечность и устойчивость HMA к разрушению.

# Признательность

Исследователи с благодарностью выражают признательность за техническую поддержку, оказанную компанией Arab Contractors за предоставление необходимого лабораторного оборудования.

# Информация о финансировании

Это исследование получило внутреннюю поддержку только от авторов.

# Вклад автора

**Ахмед Абу Эль-Маати:** организовал подготовку рукописи, предоставил технические консультации по полученным результатам, участвовал в анализе данных и обсуждении результатов, внес вклад в написание рукописи.

**Абдулла Эльмохр:** участвовал в выполнении необходимых исследований, проведении и анализе полученных результатов, внес вклад в написание рукописи.

# Этика

Данная рукопись в ее нынешнем виде не была опубликована где-либо еще, однако некоторые моменты сходства были опубликованы в предварительных версиях. Таким образом, авторам не известны этические проблемы, которые могут возникнуть после публикации данной рукописи.

**Ссылки**

Аль-Абдул Ваххаб Х.И. и Хаснайн Дж. (1998). Лабораторное исследование долговечности асфальтобетона в Джидде. Строительство и окружающая среда, том 33, № 4, стр. 219-230, издано Elsevier Science Ltd.

AL-Zubaidi I и Sarsam SI (2014). Сопротивление деформации при повторных нагрузках состаренного и переработанного устойчивого дорожного покрытия. Американский журнал гражданского и строительного строительства AJCSE 1(2):34-39.

Анил Прадьюмна, Абхишек Миттал, Джайн П.К. (2013). Характеристика восстановленного асфальтового покрытия (RAP) для использования в битумном дорожном строительстве. Procedia - Social and Behavioral Sciences 104 1149 - 1157.

Aravind.K, и Animesh Das (2006). Проектирование дорожных покрытий с использованием регенерированных асфальтобетонных смесей горячего смешивания на центральном заводе. Строительство и строительные материалы, том 21, №3, стр. 928-936.

Барон Колберт 1, Жаньпин Ю (2012). Определение механических характеристик изготовленных в лаборатории горячих асфальтобетонных смесей с использованием контролируемых фракций RAP и первичных заполнителей. Строительство и строительные материалы 26 655-662

Селауро, К., Бернардо, К., и Габриэле, Б, (2010). Производство

инновационного, переработанного и высокоэффективного асфальта для дорожных покрытий. Журнал "Ресурсы, сохранение и переработка", 54 (6), 337 - 347.

Chen, J., Wang, C. & Huang, C. (2009). Инженерные свойства битумных смесей, смешанных со вторым восстановленным асфальтовым покрытием (R2AP), Дорожные материалы и проектирование дорожных покрытий, 10, 129-149.

Feipeng Xiao a & Serji N. Amirkhanian (2009). Лабораторное исследование повреждения влаги в прорезиненных асфальтобетонных смесях, содержащих восстановленные асфальтобетонные покрытия. Международный журнал по строительству дорожных покрытий, том 10, № 5, 319-328.

FHWA, Федеральное управление автомобильных дорог (2002). Руководство пользователя для отходов и побочных материалов при строительстве дорожных покрытий. Вашингтон, Федеральное управление автомобильных дорог.

Gorkem C. и Sengoz B., (2009). Прогнозирование разрушения и повреждений, вызванных влажностью, асфальтобетона, подготовленного с использованием модифицированного полимерами битума и гашеной извести. Строительство и строительные материалы 23, 2227-2236.

Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2010). Лабораторное исследование устойчивости к растрескиванию горячих асфальтобетонных смесей, содержащих отсеянные регенерированные асфальтовые покрытия. Журнал "Материалы в гражданском строительстве", том 23, №11, стр.1535-1543.

Канитпонг К., и Бахиа Х. (2006). Оценка повреждения влагой HMA в Висконсине в связи с эксплуатационными характеристиками дорожного покрытия. Совет по транспортным исследованиям, Вашингтон, округ Колумбия, 85-я ежегодная встреча 22-26 января 2006 г.

Katman HY, Ibrahim MR, Matori MY, Norhisham S, Ismail N, Che Omar R (2012). Прочность на разрыв восстановленного асфальтового покрытия. Международный журнал гражданской и экологической инженерии IJCEE-IJENS Том 12 № 03.

Mengqi, W., Haifang, W., Muhunthan, B., & Kalehiwot N. (2012). Влияние содержания RAP на распределение воздушных пустот, проницаемость и модуль упругости базового слоя в асфальтобетонных покрытиях с рециклированием. Труды 91-го заседания Совета по транспортным исследованиям.

Миро Р., Г.Вальдес, А.Мартинес, П.Сегура, К.Родригес (2011). Оценка поведения высокомодульной смеси с высоким процентным содержанием восстановленного асфальтового покрытия (RAP) для устойчивого дорожного строительства. Строительство и строительные материалы 25 (10) 3854-3862

Moghadas F., Azarhoosh A.R. и Hamedi GH.H. (2012). Влияние использования не материалов для снижения восприимчивости горячей асфальтовой смеси к влаге. Строительство и строительные материалы 31, 384-388.

NCHRP, Национальная кооперативная программа исследований автомобильных дорог (2001). Рекомендуемое использование восстановленного асфальтового покрытия в методе проектирования смесей Superpave: руководство для техников. Совет по транспортным исследованиям, NCHRP Report 452.Вашингтон, округ Колумбия.

Озен Х. (2011). Оценка колейности асфальтовых смесей, модифицированных гашеной известью и SBS, для лабораторных и полевых уплотненных образцов. Строительство и строительные материалы 25, 756-765.

Пол, Х. Р., (1996) Оценка переработанных проектов на предмет производительности, Труды Ассоциации производителей асфальта

Технология укладки, том 65, стр. 231-254.

Путтагунта, Р., Олоо, С. Й., и Берган, А. Т. (1997). Сравнение прогнозируемых характеристик первичного и вторичного сырья. Кандианский журнал гражданского строительства, том 24, стр. 115-121.

Рейес-Ортис О, Берардинелли Е., Альварес А.Е. (2012). Carvajal-Muñoz J.S., Fuentes L.G., Оценка горячих асфальтовых смесей с заменой заполнителей материалом восстановленного асфальтового покрытия (RAP), Procedia - Social and Behavioral Sciences 53 379 - 388.

Саад Исса Сарсам\*, Исраа Лутфи АЛ-Зубайди (2014). Оценка свойств на растяжение и сдвиг состаренного и переработанного устойчивого дорожного покрытия. Международный журнал научных исследований в области знаний, 2(9), стр. 444-452.

Сарсам С.И., Аль-Джанаби И (2014). Оценка прочности на сдвиг и сжатие регенерированного асфальтобетона. Международный журнал научных исследований в области знаний, 2(8).

Широдкар П., Й.Мехта, А.Нолан, К.Сонпал, А.Нортон, К.Томлинсон Дубис, П.Салливан, Р.Заубер (2011). Исследование по определению степени частичного смешивания, вяжущего из восстановленного асфальтового покрытия (RAP) для горячей асфальтовой смеси с высоким содержанием RAP. Construction and BuildingMaterials25(1)150-155.

Табакович А., А.Гибни, К.МакНелли, М.Д.Гилкрист (2010). Влияние переработанного асфальтового покрытия на усталостные характеристики асфальтобетонного основания. Журнал "Материальный песок" Гражданское строительство 22 (6) 643-650.

Vislavicius K. Sivilevicius H, H. Sivileviciusˇius, H. Sivilevicius (2013). Влияние изменения градаций регенерированного асфальтового покрытия на однородность регенерированного асфальта горячей смеси. Архив гражданского и механического строительства 3 4 5 - 3 5 3.