

УДК: 691.168  
DOI: 10.52409/20731523\_2023\_1\_14  
EDN: EXDWYX



## Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы

А.А.Игнатьев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФАУ «РОСДОРНИИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Вопросам совершенствования асфальтобетонов уделяется в последнее время большое внимание. Это связано с необходимостью продления сроков эксплуатации асфальтобетонного покрытия в условиях постоянного роста транспортных нагрузок, интенсивности движения и климатических факторов, а также необходимости расширения функциональных свойств покрытия. Цель исследования: определить перспективы развития и направления совершенствования асфальтобетонов. Задачами исследования являются: анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, направленных на изучение характеристик асфальтобетона от введения добавок и новых компонентов в состав асфальтобетонной смеси, а также определить направления развития асфальтобетонов.

*Результаты.* В ходе обзора исследований было выявлено четыре основных вектора развития асфальтобетона. Первый направлен на введение добавок, способных при применении микроволнового воздействия обеспечить самозалечивание микротрещин покрытия. Второй вектор более перспективен и скорее его можно отнести к понятию «умных» материалов, где вводимые добавки обеспечивают возможность для асфальтобетонного покрытия использовать технологии, широко распространенные для интеллектуальных транспортных систем, за счет электропроводимости смеси. Третий вектор связан с поиском вариантов замены основного вяжущего (битума) на другие виды вяжущих или оценка возможности применения комбинаций вяжущих, как цемент и битум одновременно. Четвертый вектор направлен на оценку вводимых добавок непосредственно в саму асфальтобетонную смесь в виде различных волокон, как природного происхождения, так и искусственно полученных. Широта применяемых волокон очень разнообразна и работ, посвященных этим исследованиям достаточно много.

*Выводы.* Результаты исследований позволяют установить современные тенденции в развитии асфальтобетонных покрытий и оценить перспективные добавки в асфальтобетон, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик и получение новых востребованных свойств покрытия, что дает основание для формирования дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** асфальтобетон; композиционные дорожные материалы; направления развития асфальтобетона; покрытие; добавки в асфальтобетон.

**Для цитирования:** Игнатьев А.А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ, 2023 № 1 (63), с.14-30, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_1\_14, EDN: EXDWYX

# Additives in asphalt concrete. Literature review

A.A. Ignatyev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> FAI "ROSDORNII", Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> "Yaroslavl State Technical University", Yaroslavl, Russian Federation

**Abstract.** *Statement of the problem.* Recently a lot of attention has been paid to the problems of improving asphalt concrete. This is due to the need to extend the service life of asphalt concrete pavement in conditions of constant growth in traffic loads, intensity of traffic and climatic factors as well as the need to extend the functional properties of the pavement. The purpose of the study is to determine the prospects of development and directions of improvement of asphalt concretes. The aims of the research are to analyse the works of domestic and foreign researchers aimed at examining the characteristics of asphalt concrete by introducing additives and new components into asphalt concrete mixture and identify the directions of asphalt concrete development. *Results.* During the research review, four main vectors of asphalt concrete development were identified. The first one is aimed at the introduction of additives able to provide self-healing of pavement microcracks when microwave exposure is used. The second vector is more promising and can rather be attributed to the concept of "smart" materials, where the input additives provide an opportunity for asphalt concrete pavement to use technologies widely used for intelligent transport systems due to the electrical conductivity of the mixture. The third vector is related to the search for options to replace the main binder (bitumen) with other types of binders or to evaluate the possibility of using combinations of binders, such as cement and bitumen simultaneously. The fourth vector is aimed at evaluating the additives introduced directly into the asphalt concrete mixture itself in the form of various fibers, both of natural origin and artificially obtained. The range of applied fibers is very diverse and the works devoted to these researches are quite numerous. *Conclusions.* The results of the researches allow establishing modern tendencies in the development of asphalt concrete coatings and estimating perspective additives in asphalt concrete which provide increase in operational characteristics and formation of new demanded properties of coatings that gives the grounds for further researches.

**Key words:** asphalt concrete; composite road materials; directions of asphalt concrete development; pavement; additives in asphalt concrete.

**For citation:** Ignatyev A.A. Development prospects and directions of asphalt concrete improvement // News KSUAE 2023 № 1 (63), p. 14-30, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_1\_14, EDN: EXDWYX

## 1. Введение

Развитие дорожных композиционных материалов и в первую очередь асфальтобетонных покрытий ведется по нескольким направлениям. Высокая стоимость компонентов асфальтобетона, возросшие транспортные нагрузки на дорожные одежды, постоянное воздействие климатических факторов, выход на рынок новых материалов с новыми свойствами создают предпосылки для проведения разносторонних поисковых исследований.

В данной статье представлен обзор теоретических исследований, охватывающий последние тенденции в развитии асфальтобетонов. Асфальтобетон является широко распространенным дорожно-строительным композиционным материалом во всем мире. Состав асфальтобетонных смесей совершенствуется на протяжении многих лет. Так щебеночно-мастичный асфальтобетон (рисунок 1) представляет собой четыре базовых компонента: крупный и мелкий каменный заполнитель, минеральный порошок, вяжущее (битум) и пятый компонент - стабилизирующая добавка. В настоящее время отечественные и зарубежные исследователи активно проводят теоретические и экспериментальные исследования по оценке возможности включения новых компонентов в асфальтобетонные смеси (рисунок 2). Это связано с целым рядом причин. Так, каменный материал, который призван обеспечить устойчивость покрытия к восприятию

транспортных нагрузок и сформировать жесткий каркас, имеет несколько ограничений, связанных с производством и физико-механическим характеристикам. В ряде стран отсутствует возможность добычи каменных материалов, которые могут быть эффективно использованы в асфальтобетонных покрытиях, и могли бы удовлетворять потребности дорожной отрасли. Приходится искать альтернативные варианты или разрабатывать иные механизмы включения различных вторичных ресурсов (отходов) и не используемые ранее компоненты. Аналогичная ситуация наблюдается и для мелкого заполнителя, минерального порошка и вяжущего в виде битума. Каждый из традиционных компонентов смеси (рисунок 1), в совокупности, обеспечивающий требуемые эксплуатационные показатели готового асфальтобетонного покрытия, имеет в разных странах, свои ограничения и, очевидно, что поиск новых компонентов является актуальной задачей для многих стран. При этом эксплуатационные характеристики получаемого асфальтобетонного покрытия не должны быть хуже традиционных смесей или же должны иметь новые востребованные физико-механические характеристики для продолжительной эффективной эксплуатации в течение всего года и на протяжении требуемого количества лет эксплуатации.



Рис. 1 – Традиционный состав щебеночно-мастичного асфальтобетона (иллюстрация авторов)  
 Fig. 1 - Traditional composition of crushed-mastic asphalt concrete (illustration by the authors)

Новым направлением развития асфальтобетонных смесей стала возможность внедрения различных техногенных отходов, побочных продуктов производства, вторичных ресурсов различных производств в асфальтобетонные смеси и особенно в последние годы, в связи с пристальным вниманием мировой общественности к вопросам экологии. Причем использование вторичных ресурсов затрагивает все компоненты асфальтобетонной смеси.

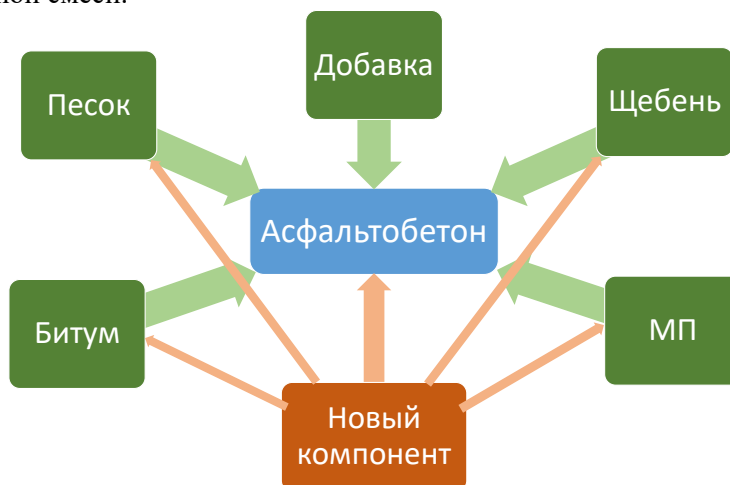


Рис. 2 – Схема включения новых компонент в асфальтобетонную смесь (иллюстрация авторов)  
 Fig. 2 - Scheme of inclusion of new components in the asphalt mixture (illustration by the authors)

Отдельно проводятся исследования, направленные на поиск омолаживающих составов для покрытий [1], которые бы обеспечили работоспособность асфальтобетонного покрытия и за постгарантийным сроком эксплуатации. В этом направлении работают и производители битумных материалов, которые выводят на рынок новые омолаживающие составы, наносимые непосредственно на поверхность покрытия или вводимые в разогретую смесь при холодной или горячей регенерации покрытия, а также при применении гранулята старого асфальтобетона в новых смесях. Важным направлением исследований является поиск таких новых компонентов для асфальтобетонной смеси, которые были бы способны решать уникальные задачи эксплуатации покрытия или обладали бы уникальными физико-механическими характеристиками, как например, возможность самостоятельной борьбы покрытия со снежно-ледяными отложениями, самодиагностика покрытия и токопроводимость, нагреваемость, поглощение радиоволн, интеллектуальное покрытие, как элемент интеллектуальных транспортных систем, самозалечиваемые покрытия и целый ряд других уникальных свойств.

Цель исследования заключается в установлении направлений совершенствования асфальтобетонов в мире. Задачами исследования являются:

- 1) анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, направленных на изучение характеристик асфальтобетона от введения добавок и новых компонентов в состав асфальтобетонной смеси;
- 2) определить дальнейшие векторы развития асфальтобетонов в мире на основе анализа опубликованных результатов исследований преимущественно за последние 3-5 лет;

## 2. Материалы и методы

Для анализа исследований отечественных и зарубежных авторов, были отобраны те работы, в которых изучались характеристики асфальтобетонов, укладываемых в горячем состоянии и изготавливаемые по традиционной технологии приготовления асфальтобетонных смесей. Работы, посвященные изучению характеристик холодных, литых, песчаных и пористых асфальтобетонных смесей в данном исследовании не представлены. Методики испытаний асфальтобетонов в разных странах отличаются и имеют свои особенности и специфику, поскольку климатические условия эксплуатации покрытий также значительно отличаются. В данном обзоре исследований, в области совершенствования асфальтобетонов, рассматривались работы авторов, которые применяли в основном методологию объемного проектирования асфальтобетонных смесей по Маршаллу. Методология объемно-функционального проектирования Supergrave не рассматривалась. Алгоритм объемного проектирования по Маршаллу включал в себя подбор минерального заполнителя на первом этапе, а затем подбор битумного вяжущего. По итогам испытаний исследователями определялся оптимальный состав асфальтобетонной смеси с ожидаемыми свойствами. Практически все работы включали в себя проведение испытаний на стабильность и текучесть, оценку объемной плотности образцов, проводились исследования образцов на сопротивление пластическому течению по методологии Маршалла, оценивалась водостойкость, проводились испытания по методу трехточечного испытания образцов асфальтобетона на изгиб и методу определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса, оценивалась разрушающая нагрузка по Маршаллу. В ряде работ применялись специфические методы испытаний присущие тем странам, в которых это закреплено нормативными документами.

## 3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим подробнее направления совершенствования асфальтобетонов и научно-поисковые работы отечественных и зарубежных авторов. Основной упор будет сделан на публикации последних пяти лет.

### *Компоненты асфальтобетонной смеси. Крупный каменный заполнитель.*

Функционально асфальтобетонное покрытие призвано удовлетворять потребность в непрерывности покрытия и восприятию нагрузок от транспорта в течение всего года со своими циклами замораживания и оттаивания, увлажнения и просыхания, воздействием осадков, солнечной радиацией и др. В классической рецептуре асфальтобетонной смеси

крупный заполнитель преимущественно представлен прочными каменными заполнителями, обладающим требуемыми физико-механическими характеристиками, значительным весом и прочностью. Однако, в ряде случаев, возникает потребность в замене дорогого материала на более дешевые аналоги. В работе [2] авторы описывают проблему утилизации строительного лома, в частности, бывших в употреблении бетонных изделий. Так щебень из бетонного лома в объеме 40% от массы крупного заполнителя, содержащий известняк и доломит применялся в качестве компонента для приготовления асфальтобетона. Результаты испытаний показали возможность применения вторичного щебня из лома бетонных конструкций, при частичной замене природного щебня в структуре асфальтобетона. Аналогичная работа проводилась исследователями из других стран [3,4]. Помимо важных эксплуатационных характеристик асфальтобетонных смесей иногда требуются специфические свойства смесей, такие как огнестойкость и огнезащита. Особенно это востребовано в тоннелях и закрытых пространствах. Так в работе [5] проводились исследования по введению в качестве крупного заполнителя сталеплавильного шлака взамен традиционного щебня с целью повышения огнезащитных свойств смеси. Дополнительно в смесь в количестве 8% вводились антипирены от массы всей смеси. В работе [6,7] авторы комбинировали сталеплавильный шлак и отходы доломитового песка в структуре асфальтобетонной смеси. Результаты испытаний показали, что включение данных компонентов дают возможность обеспечить более высокое сопротивление усталостному разрушению, чем эталонные смеси. В работе [8] авторы заменили часть крупного заполнителя на алюминиевые шлаки, а вместо минерального порошка применяли измельченную керамическую плитку. Наилучшие результаты для нагруженного движения показала смесь с содержанием до 30% алюминиевого шлака, при 50% для легкого движения, при 20% для среднего движения. Здесь важно отметить тот факт, что шлаки от производства стали, олова, алюминия, меди и других металлов активно применялись еще с середины двадцатого века в качестве альтернативы крупного каменного материала и опыт применения был подтвержден успешностью эксплуатации покрытия, поэтому поиск новых компонентов взамен традиционных является оправданным.

#### ***Минеральный порошок.***

Работы, связанные с заменой традиционного минерального порошка на новые компоненты, встречаются достаточно часто. Они занимают лидирующие позиции среди поисковых исследований в области асфальтобетонов. Очевидно, это связано с многообразием материалов, отходов, ресурсов, схожих по дисперсности, характеристикам и свойствам, а также в связи с небольшой долей (до 15%) данного компонента в структуре асфальтобетонного покрытия. Так исследователи [9] проводили оценку применения относительно слабого доломитового заполнителя в качестве минерального порошка, находящегося на территории Латвии в асфальтобетоне. В ходе испытаний было установлено, что введение минерального порошка из слабых доломитовых пород незначительно ухудшает свойства асфальтобетона по сравнению с эталонной смесью А16 и традиционным минеральным порошком. В работах [10,11] авторами исследовался молотый гранулированный доменный шлак в качестве альтернативы минеральному порошку в асфальтобетонной смеси. Оптимальное количество вяжущего (битума) составило 5,5%, традиционный минеральный порошок заменяется полностью молотым гранулированным доменным шлаком.

Отходы от сжигания каменного угля, в виде золошлаковых отходов, уже активно используются в качестве вторичного ресурса, однако из-за нестабильности свойств уникального решения еще не предложено. Так исследователи продолжают рассматривать разные варианты применения золошлаков, в том числе в качестве компонентов для асфальтобетона. Утилизация золошлаков [12-15] не только решает проблемы утилизации отходов, но и обеспечивает экономичный эффект от применения их в составе строительных материалов [16]. Производство горячей асфальтобетонной смеси является дорогостоящим, поэтому потребность в поиске альтернативных материалов, которые могли бы минимизировать затраты на производство без ухудшения его эксплуатационных характеристик [17, 15] очень высока. Исследователи показали, что минеральный порошок играет важную роль в заполнении пустот между крупным и

мелким заполнителями, что позволяет повысить стабильность, плотность и прочность асфальтобетонного покрытия [18, 19].

Ряд поисковых работ, посвящен замене минерального порошка гашеной известью [20, 21]. Так в работах [22-25] вместо части минерального порошка было предложено использовать 2,5% от веса всей минеральной части гидратированной извести. В результате экспериментальных исследований было установлено, что повышается теплопроводность асфальтобетона, снижается внутреннее напряжение покрытия в зимний период, улучшается трещиностойкость.

В работе [26] авторы проводили исследования по замене минерального порошка на технический углерод. Авторами было установлено оптимальное содержание технического углерода в виде сажи в объеме 5% от массы минеральной части. В результате удалось улучшить механические характеристики асфальтобетонных смесей при стандартных методиках испытаний и полезные свойства асфальтобетона. Улучшились сдвиговые свойства, устойчивость к колее, по сравнению с эталонными смесями.

Ряд работ посвящен оценке возможности включения специфических побочных продуктов и отходов промышленности, а также техногенных отходов в качестве минерального порошка для асфальтобетона, например, золы [27], золы рисовой шелухи [28], доменного шлака [29, 30], молотого сталеплавильного шлака [31], отработанного литейного песка [32], золы от скорлупы пальмовых зерен, золы шелухи проса и каолин [33], золы от рисовой соломы [34], кофейной шелухи [35], кокосовой скорлупы (порошок) [36, 37] кукурузного крахмала [38], жмыха сахарной промышленности [39], отходов из пылеуловителей асфальтобетонных заводов [40], смолы (канифоль) [41], золы сточных вод [42], золы уноса [43], отработанной формовочной смеси [44], строительных отходов [45], красного шлама [46], отходов с нефтяных отложений (парафиновые отложения) [47] и других. В работе [17] авторы объединили золу уноса и карбонизированную рисовую шелуху для изучения пригодности в качестве компонента в производстве асфальтобетона. Ряд работ направлены на изучение влияния серы на свойства асфальтобетона [48, 49].

### ***Битум.***

Вопросам модификации битума уделяется повышенное внимание в настоящее время, поскольку эффективность работы асфальтобетонного покрытия напрямую зависит от характеристик вяжущего.

Битум, обеспечивая функции вяжущего для соединения крупного каменного заполнителя, мелкого заполнителя и минерального порошка формирует монолитное покрытие. Благодаря своим адгезионным, а также пластическим свойствам при нагревании и твердому состоянию при охлаждении битум обеспечивает заданные эксплуатационные характеристики асфальтобетонному покрытию. Однако термопластичность и низкая прочность при отрицательных температурах делает битум наиболее чувствительным, среди всех компонентов асфальтобетона, к воздействию транспортных нагрузок и климатических факторов. Размягчение битума при летних температурах вызывает пластические деформации, а зимняя хрупкость приводит к возникновению низкотемпературного растрескивания. Модификация битума такими полимерными добавками, как термоэластопласты типа SBS, латекс, позволяют улучшить свойства битума и повысить долговечность асфальтобетона и получить полимерно-битумное вяжущее [50]. Эти добавки повышают когезионную прочность и термостойкость битума, придают ему эластичность, улучшают его поведение при низких температурах. Однако из-за их высокой стоимости многие пытаются найти замену дорогостоящим модификаторам на более дешевые аналоги, например пластиковые отходы [51, 52]. Результаты использования пластиковых отходов в качестве полимера для модификации битума и замены заполнителя в асфальтобетоне показывают, что существует потенциал для получения экологических преимуществ по сравнению с первичными полимерами и природными заполнителями [53]. Проведенные исследования показывают, что характеристики асфальтобетонных смесей, включающих отходы пластмасс, зависят от нескольких аспектов, а именно: типа пластика [54, 55] и его содержания [12, 13]; температуры и времени смешивания [54]; процесса производства [56].

Для придания асфальтобетону эластичных и упругих свойств резины в него добавляют резину отработанных автомобильных шин. Более того, использование крошки автомобильных шин очень привлекательно с точки зрения решения вопросов экологии [57]. Согласно отечественной и зарубежной классификации, «резиноасфальтовяжущее» представляет собой смесь битума переработанных резиновых шин и определенных добавок, в которой крошка составляет не менее 15 процентов от общего веса смеси и вступила в реакцию с разогретым битумом в достаточной степени, чтобы обеспечить набухание частиц резины. Взаимодействие между асфальтовяжущим и резиновой крошкой не является химической реакцией. Это физическое взаимодействие, при котором резиновая крошка поглощает ароматические масла и легкие фракции (небольшие летучие или активные молекулы) из асфальтового вяжущего и выделяет некоторые из аналогичных масел, используемых при производстве резины, в асфальтовяжущее [58]. Реакция, происходящая между битумом и гранулированной резиной, приводит к изменению свойств резины [59]. После прохождения реакции резина приобретает эластичную структуру, оказывающую положительное влияние на асфальтовяжущее. Авторы в своих работах [60, 61] показали, что гранулы резины увеличиваются в объеме примерно в два раза от первоначального состояния при смешивании с горячим битумом. Также показано, что наилучшие характеристики резиноасфальтобетонной смеси получаются при применении частиц резины в диапазоне от 0,425 до 1,18 мм. Авторы в работах [62-69] показали, что битум и резина от шин могут быть использованы для получения нового вяжущего для асфальтобетонных смесей. В первую очередь, это связано с улучшением характеристик асфальтобетона [70-74] и увеличением толщины пленок вяжущего, долговечности и гибкости, несмотря на их низкую стабильность по методике Маршалла. По данным авторов [75, 76], добавление резиновой крошки повышает устойчивость асфальтобетонного покрытия к усталостному растрескиванию, также как показали и авторы в работе [67]. К такому же выводу пришли авторы в своей работе [77], когда показали, что использование резинового лома увеличивает усталостную прочность асфальтобетонного покрытия примерно на 25 процентов. В работе [61] установлен оптимальный диапазон введения резиновой крошки от 6% до 12%. В работе [78] авторы использовали резиновую крошку в качестве замены крупного заполнителя. В ходе испытаний было установлено, что оптимальное содержание крошки составляет 20% от веса крупного заполнителя. При этом оптимальное содержание битума составляет 5,5%.

Работ, посвященных изучению свойств битума, модифицированного различными добавками также достаточно много. Данная тенденция обусловлена необходимостью расширения и улучшения характеристик и свойств битума, как ключевого компонента, определяющего эффективную работу в течение требуемого периода эксплуатации.

#### ***Волокнистые добавки, вводимые в структуру асфальтобетонных смесей.***

Анализ работ, посвященных введению различных видов добавок в асфальтобетонные смеси, показал, что современные исследования направлены не только на поиск новых материалов, улучшающих физико-механические характеристики асфальтобетонной смеси, но и на поиск различных новых добавок, которые могли бы изменить механику работы покрытия, продлить срок службы, расширить температурные диапазоны работы и обеспечить требуемые характеристики покрытию.

Авторы в работе [79] решали актуальную задачу по продлению сроков службы асфальтобетонного покрытия и снижению колеи от воздействия транспортных средств при высоких температурах наружного воздуха в Эфиопии. Исследования проводились с использованием щебне-мастичного асфальтобетона и включением в его структуру бамбукового волокна и волокон сахарного тростника и жмыха от производства сахара. Результаты показали положительный отклик при оценке на колею и прочность на растяжение. В похожей работе [80] авторы исследовали характеристики асфальтобетонной смеси с включением в их структуру джутовых волокон. В данном исследовании джутовое волокно использовалось в качестве армирующего материала и оценивалась его деформационная стойкость. Влияние волокна на содержание вяжущего способствовало увеличению расхода, вяжущего на 4-5%, при этом стабильность асфальтобетона увеличилась. Расход джутового волокна составил от 0,5% до 1% от веса смеси. Оптимальным было установлено содержание волокон с расходом 0,5%.

В работе [81] авторы исследовали возможность включения в состав асфальтобетона стальных волокон. Авторы вводили в асфальтобетонную смесь стальные волокна (фибру) в количестве 0,50% и 1,00% и исследовали полученные характеристики. Стальные волокна имели диаметр от 0,30 мм до 1,10 мм и длину от 15 мм до 50 мм. По сравнению с пропиленовыми волокнами стальные волокна имеют очень высокий модуль упругости, что дает им неоспоримые преимущества. Также было установлено, что введение более коротких волокон упрощает процедуру приготовления и улучшает механические характеристики асфальтобетона. Сделано предположение, что волокна будут способствовать продлению срока эксплуатации покрытия.

В области упрочнения асфальтобетонной смеси волокнистыми материалами проводятся многочисленные исследования [82]. Авторы в своей работе [83] провели ряд экспериментальных исследований асфальтовязующего с введением разного количества керамического волокна. Результаты показали, что асфальтовязующее, обладает лучшей трещиностойкостью и высокой температурной стабильностью по сравнению с традиционным асфальтобетоном. Авторы в работе [84] изучали характеристики асфальтобетонной смеси с включением волокон кукурузных стеблей. Результаты показали, что волокно улучшает механические характеристики смеси и температурную стабильность. В работе [85] авторы сравнили полиэфирное и полипропиленовое волокно. В ходе экспериментальных испытаний было установлено, что нейлоновое и углеродное волокно улучшают характеристики асфальтобетонной смеси по сравнению с традиционной асфальтобетонной смесью. Авторы в работе [86] экспериментально оценивали свойства модифицированной диатомитовым стекловолокном асфальтобетонной смеси. В ходе исследований было показано, что стекловолокно улучшило устойчивость диатомитовых асфальтобетонных смесей к низкотемпературному растрескиванию. В работе [87] авторами изучались характеристики асфальтобетонной смеси и асфальтобетона с введенной в состав смеси фибры стекловолокна различной длины. В результате было установлено, что чем длиннее фибра, тем более лучшие показатели на изгиб и сопротивление на колееобразование. На модуль деформации длина волокна практически не оказала влияния. Длинное волокно лучше передает напряжение, чем короткое. Улучшились вязкоупругие характеристики асфальтобетона и сопротивление усталостной прочности. Авторы в своей работе [88] изучали возможность армирования асфальтобетонных смесей фиброй от бывшей в употреблении тары из ПЭТФ. В ходе исследований было установлено оптимальное содержание фибры в количестве 0,7% от общего веса асфальтобетонной смеси. Также было установлено, что волокна значительно улучшают динамический модуль сдвига и повышается сопротивление колееобразованию.

Авторы в работе [89] сравнили свойства асфальтобетонных смесей из магнезиального волокна, лигнинового волокна, базальтового волокна и полиэфирного волокна. Результаты показали, что асфальтобетонная смесь с волокнами демонстрирует лучшую высокотемпературную стабильность, устойчивость к низкотемпературному растрескиванию и водостойкость по сравнению с традиционной асфальтобетонной смесью.

В целом количество работ посвященных введению новых волокнистых добавок в состав асфальтобетонной смеси в последние годы значительно возросло. Это обусловлено необходимостью решения задач по внутреннему армированию материала и повышению несущей способности асфальтобетонного покрытия для восприятия различных нагрузок. Данное направление исследований активно развивается и результаты испытаний дают основание для дальнейших активных поисков новых добавок, обеспечивающих получение новых характеристик для асфальтобетонного покрытия.

#### ***Добавки, обеспечивающие новые свойства асфальтобетону.***

Многие исследователи, решая задачи по улучшению характеристик асфальтобетона, осуществляют поисковые работы для продления срока эксплуатации покрытия, получения новых свойств и улучшения его эксплуатационных характеристик. Так в исследовании иранских авторов [90] была предпринята попытка изучения возможности использования отработанного моторного масла (WEO) и отработанного кулинарного жира (WCO) в качестве омолаживающего состава для асфальтобетона,



включающего гранулят старого асфальтобетона (RAP). В асфальтобетон, содержащий 25%, 50% и 75% RAP, было добавлено отработанное масло и кулинарный жир, в количестве 5%, 10% и 15% (к весу вяжущего), и изучалось их влияние на свойства ползучести и усталости. В результате было установлено, что более вязкое отработанное масло имеет более выраженный положительный эффект на свойства смеси. Оптимальное количество добавки составляет не более 10% от веса вяжущего. Похожая работа была выполнена авторами [91] с целью изучения влияния омолаживающей добавки в виде отработанного масла в гранулят старого асфальтобетона. Так в ходе испытаний было установлено, что для умягчения смеси целесообразно использовать масло в соотношении 11:4, а для повышения эксплуатационных свойств резиновую нанокрошку в количестве 2,5% от веса гранулята старого асфальтобетона. Результаты испытаний показали, что данный материал может быть применен для изготовления тротуарной плитки. Тем не менее водопоглощение оказалось низким и составило 8%.

В работе [92, 93] авторы предложили в качестве омолаживающего состава использовать композитные капсулы альгинат кальция и атапульгит. Капсулы вводились в состав асфальтобетонной смеси с целью омоложения состава в процессе последующей эксплуатации. За счет многокамерности структуры капсулы она эффективно, в процессе имитационного старения, высвобождает масло, что снижает окисление вяжущего. Капсулы в процессе испытаний не деформировались, что говорит об успешности испытаний. Также было установлено, что введение капсул способствует продлению срока службы покрытия. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку эффективности капсул под воздействием ультрафиолетового излучения. В работе [94] проводились аналогичные исследования только для пористых а.б. смесей. Результаты также охарактеризованы как положительные.

Отдельным новым направлением исследований в вопросах восстановления небольших повреждений на покрытии, заживлении небольших трещин выступают исследования, связанные с изучением свойств покрытия от воздействия на него микроволн. В этом направлении предлагается сразу несколько решений, которые в зависимости от условий эксплуатации могут быть реализованы. Так в работе [95] автором исследован механизм микроволнового воздействия на образцы асфальтобетона, включающие в своем составе, помимо традиционных компонентов, стальную фибру или графит. И графит, и фибра обеспечивают получение новых свойств у материала, при этом характер влияния разный, что способствует появлению и новых механизмов работы. В работе описаны первичные механизмы и параметры нагрева покрытия для получения положительного результата. Аналогичные исследования описаны в работе [96], где авторы также включали стальные волокна и графитовый порошок. По результатам исследований введение 1% делает асфальтобетон проводником, и они являются эффективным средством для улучшения прочности асфальтобетона на растяжение. С ростом процентного содержания графита снижается модуль пластичности. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование совместного введения стальных волокон и графита. В похожей работе [97] авторы провели большое исследование по оценке результатов электропроводимости асфальтобетона при введении в него в различном объеме графитового порошка. Так, результаты исследований показали, что введение 20% графитового порошка от массы минеральной части, способствует максимальной электропроводимости и повышению трещиностойкости готовых образцов. В дальнейших планах у исследователей изучить свойства электропроводящих покрытий на возможности по нагреву покрытия и решение задачи борьбы с зимней скользкостью. В работе [98] авторы изучали возможности для самодиагностики за счет вводимых в асфальтобетон графитового порошка и углеродного волокна. Так, в результате испытаний, было установлено, что при нарушении целостности и разрушении активно увеличивалось удельное сопротивление. Данные исследования показали, что это направление исследований имеет перспективы для дальнейшего внедрения подобных материалов. В работе [99] авторы изучали электропроводимость асфальтобетонной смеси при введении углеродных микрофибр длиной от 3 до 12 мм. Объем введения до 2% от веса асфальтобетонной смеси. Результаты испытаний показали эффективность применения фибры для повышения электропроводимости смеси. В работе [100] авторы исследовали свойства асфальтобетонной смеси с включением 4% графита и 9% ПЭТФ. В

результате подбора компонентов удалось установить наилучший результат. Теплопроводность графитополимерного асфальтобетона улучшилась и увеличилась с повышением температуры, что будет способствовать самозалечиванию покрытия.

В работе [101] исследовалось влияние углеродных материалов в виде углеродных волокон, углеродных нанотрубок и графитовых нановолокон на механические свойства и самовосстанавливающие свойства асфальтобетона. Способность восстанавливать свои свойства была изучена на основе индукционного нагрева. При введении 0,5% углеродных нанотрубок и графитовых нановолокон позволило увеличить прочность на растяжении и обеспечило наилучшую способность к самовосстановлению. При этом введение только углеродных волокон не оказало заметного влияния на прочность, однако показало повышение прочности при изгибе при отрицательных температурах и при 20 градусах Цельсия. Введение графитовых нановолокон способствовало повышению динамической стабильности асфальтобетона. Работа будет продолжена в этом направлении.

В работе [102] авторы нашли оптимальное содержание углеродного волокна в 0,5% от веса смеси. При этом испытания проводились для волокон разной длины (5мм, 10мм, 15мм). Установлена связь электропроводимости от процентного содержания углеродного волокна. В ходе экспериментальных исследований полученный электропроводящий асфальтобетон оценивается как успешный и может эффективно использоваться для борьбы с ледяными отложениями.

В работе [103, 104] авторы проводили экспериментальные исследования по индукционному заживлению асфальтобетона входящими в состав стальными тончайшими волокнами. В ходе испытаний были проанализированы различные физические свойства смеси. Аналогичные исследования проводились в работе [105] где авторы исследовали три наполнителя для асфальтобетонной смеси: порошок диоксида марганца, углеродный порошок и ферритовый порошок. Тонкость помола не более 200 нм. В качестве микроволноотражающей добавки использовалась стальная фибра. Все добавки вводились взамен минерального порошка, но не более 4% от веса минерального заполнителя. В ходе испытаний частота волн варьировалась от 1 ГГц до 18 ГГц. В ходе испытаний было установлено, что наибольшее влияние оказывают совместно введенные порошок диоксида марганца и стальная фибра. Они оказывают наибольшее заживляющее воздействие.

В работе [106] авторы проводили исследования по оценке теплопроводности асфальтобетона и эффективность таяния снега. В качестве наполнителя смеси использовался графит, которым частично заменяли минеральный порошок от 0 до 40%. По результатам исследований было установлено, что чем больше содержание графита, тем выше теплопроводность смеси. Не изменялись свойства до и после старения смеси. Аналогичные испытания проводились авторами в работе [107] только вместо графита использовался графитовый шлак. Результаты испытаний показали, что при нагревании смеси, содержащей графитовый шлак с помощью электрического тока устойчивость к температурам, нарушается. Если смесь многократно нагревать, то скорость старения асфальтобетона увеличивается и сокращается срок службы покрытия. Также было отмечено, что данный материал обладает определенной проводимостью, но эффективность электротермического преобразования низкая. Работа продолжается для поиска подходящего содержания графитового шлака в смеси.

#### 4. Заключение

На основании проведенного обзора исследований можно сделать следующие выводы:

1. Тенденции развития асфальтобетонных покрытий направлены на поиск компонентов способных заменить традиционные материалы частично либо полностью.
2. Особое внимание отечественных и зарубежных исследователей направлено на поиск механизмов снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и более активное внедрение «зеленых» технологий. Большой объем исследований направлен на поиск вариантов утилизации отходов и использование их в качестве вторичного ресурса для полной или частичной замены компонентов асфальтобетона.
3. Поиск новых компонентов для асфальтобетонных смесей в целом носит локальный не системный характер. Зачастую исследователи используют

феноменологический подход, опираясь лишь на соответствие итогового результата действующим нормативам или незначительное превышение физико-механических показателей асфальтобетона, которые в ряде работ находятся на уровне погрешности. В основном работы сводятся к поиску добавок и компонентов, которые бы улучшали показатели покрытия, однако исследований, направленных на получение качественно нового результата в развитии композиционных дорожных материалов на данный момент практически нет.

4. В части формирования новых востребованных свойств асфальтобетонного покрытия можно выделить четыре вектора развития. Первый направлен на введение добавок, способных при применении микроволнового воздействия обеспечить самозалечивание микротрещин. Второй вектор более перспективен и скорее его можно отнести к понятию «умных» материалов, где вводимые добавки обеспечивают возможность для асфальтобетонного покрытия использовать технологии, широко распространенные для интеллектуальных транспортных систем, за счет электропроводимости смеси. Третий вектор связан с поиском вариантов замены основного вяжущего (битума) на иные виды вяжущих или возможности применения комбинаций вяжущих, как цемент и битум одновременно. Четвертый вектор направлен на оценку вводимых добавок непосредственно в саму асфальтобетонную смесь в виде различных волокон, как природного происхождения, так и искусственно полученных.

5. Результаты исследований посвященные модификации вяжущих также ограничиваются в основном локальным решением задач, как например придание битуму более упругих свойств за счет введения резиновой крошки от отработанных шин. В основном поиски направлены на улучшение свойств вяжущего (битума) и расширения температурных диапазонов работы по сравнению с исходным состоянием битума. При этом важно отметить, что в готовом покрытии само вяжущее остается со своими исходными базовыми характеристиками, а процесс модификации лишь позволяет развить исходные показатели и придать новые свойства. Решений способных значительно изменить механизм работы готового покрытия и расширить диапазон работы вяжущего от плюс  $70^{\circ}\text{C}$  до минус  $50^{\circ}\text{C}$  в изучаемых работах не обнаружено, поскольку добиться таких результатов крайне сложно при традиционной технологии приготовления асфальтобетонной смеси и применении традиционных компонентов смеси.

#### Список литературы/ References

1. Pyrig, Yan; Oksak, Serhii; Galkin, Andrey; Ilin, Iaroslav; Shyika, Yana. (2021). Recovery of the bitumen and asphalt concrete properties with rejuvenator. 197. 6-17.
2. Acosta Alvarez, Debora; Alonso Aenlle, Anadelys; Tenza-Abril, Antonio. (2018). Laboratory Evaluation of Hot Asphalt Concrete Properties with Cuban Recycled Concrete Aggregates. Sustainability. 10. 10.3390/su10082590.
3. Sulianti, Ika. (2020). Studi Pemanfaatan Limbah Beton Mutu Tinggi pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC). Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil. 9. 7-14. 10.35139/cantilever.v9i1.34.
4. Ren, Jiaolong. (2014). Pavement Performance of Asphalt Concrete Using Building Demolition Waste. Advanced Materials Research. 1044-1045. 574-577. 10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.574.
5. Ren, Yanfei; Chen, Meizhu; Yang, Tianyuan; Wu, Shaopeng; Wang, Kaifeng. (2021). Effect of Steel Slag Aggregate on Pavement and Flame-Retardant Performance of Warm-Mixed Flame-Retardant Asphalt Concrete. Materials. 14. 635. 10.3390/ma14030635.
6. Bayraktar, Oğuzhan; Altera, Abdelwahab; Soylemez, Hasan. (2019). Investigation of the Effects of Modified Bitumen on Asphalt Concrete Performance by Industrial Waste. 93-100.
7. Haritonovs, Viktors; Zaumanis, Martins; Brencis, G.; Smirnovs, Juris. (2013). Asphalt concrete performance with conventional and waste aggregates. International Journal of Pavement Research and Technology. 6. 505-510. 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).505.
8. Olugbenga, Oyedepo. (2019). Utilization of Industrial Waste Products in the Production of Asphalt Concrete for Road Construction. Slovak Journal of Civil Engineering. 27. 11-17. 10.2478/sjce-2019-0026.

9. Haritonovs, Viktors; Tihonovs, Janis; Smirnovs, Juris. (2016). High Modulus Asphalt Concrete with Dolomite Aggregates. *Transportation Research Procedia*. 14. 3485-3492. 10.1016/j.trpro.2016.05.314.
10. Kuznetsov, Dmitry; Vysotskaya, Marina; Burgonutdinov, Albert. (2020). Using Steel-Smelting Slag as a Raw Material Component in the Production of Asphalt Concrete. *E3S Web of Conferences*. 157. 06010. 10.1051/e3sconf/202015706010.
11. Al-Hdabi, Abbas; Al-Sahaf, Nibras; Alasadi, Layth; Yesar, Zahraa; Moeid, Haneen; Hassan, Mortada. (2019). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with GGBFS as filler. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 557. 012063. 10.1088/1757-899X/557/1/012063.
12. Khan, R. A.; Ganesh, A. (2016). The effect of coal bottom ash (CBA) on mechanical and durability characteristics of concrete. *Journal of building materials and structures*, vol. 3, No. 1, pp: 31-42.
13. Mohammed, S. A.; Karim, M. R. (2017). Application of coal bottom ash as aggregate replacement in highway embankment, acoustic absorbing wall and asphalt mixtures. Paper presented at the IOP Conference Series Materials Science and Engineering.
14. Singh, M.; Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, No. 2, pp: 620-630.
15. Buritatum, Apinun; Suddeepong, Apichat; Akkharawongwhatthana, Kongsak; Yaowarat, Teerasak; Hoy, Menglim; Bunsong, Chalermphol; Arulrajah, Arul. (2022). Improved Performance of Asphalt Concretes using Bottom Ash as an Alternative Aggregate. *Sustainability*. 14. 7033. 10.3390/su14127033.
16. Huang, W. (1990). The Use of Bottom Ash in Highway Embankments, Subgrades, and Subbases. Publication FHWA/IN/JHRP-90/04-1. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, <https://doi.org/10.5703/1288284314179>
17. Rengarasu, T., Juzaafi, M., Bandara, W.; Jegatheesan, N. (2019). Suitability of Coal Bottom Ash and Carbonized Rice Husk in Hot Mix Asphalt. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 13, pp: 1630-1640.
18. Modarres, A.; Rahmazadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp: 476-483.
19. Ingh, N.; Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement. *Construction and Building Materials*, vol. 23, No. 3, pp: 117276
20. Ogundipe, Olumide. (2016). Marshall Stability and Flow of Lime-modified Asphalt Concrete. *Transportation Research Procedia*. 14. 685–693. 10.1016/j.trpro.2016.05.333.
21. Ahir, Ahmad; Fadhil, Aqeel. (2018). Effect of Filler Type on the Durability of Asphalt Concrete Mixes. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 8. 10.14741/ijcet/v.8.3.36.
22. Alashaibi, Azedin; Wang, Yu; Albayati, Amjad; Byzyka, Juliana; Scholz, Miklas; Weekes, Laurence. (2022). Thermal Properties of Hydrated Lime-Modified Asphalt Concrete and Modelling Evaluation for Their Effect on the Constructed Pavements in Service. *Sustainability*. 14. 10.3390/su14137827.
23. Al-Tameemi, Ahmed; Wang, Yu; Albayati, Amjad. (2015). Influence of Hydrated Lime on the Properties and Permanent Deformation of the Asphalt Concrete Layers in Pavement. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 4. 1-19. 10.1515/rjti-2015-0027.
24. Albayati, Amjad; Wang, Yu; Haynes, Jonathan. (2022). Size Effect of Hydrated Lime on the Mechanical Performance of Asphalt Concrete. *Materials*. 15. 3715. 10.3390/ma15103715.
25. Wang, Yu; Alashaibi, Azedin; Albayati, Amjad; Haynes, Jonathan. (2022). Thermal fatigue analysis of pavement design using hydrated lime modified asphalt concrete. 23. 72. 10.1515/ijpeat-2016-0050.
26. Ahmedzade, Perviz; Alataş, Taner; Geçkil, Tacettin. (2008). Use of Carbon Black as Filler in Asphalt Concrete. *Teknik Dergi*. 19. 4539-4544.
27. Mistry, R.; Roy, T. K. (2016). Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. *Perspectives in Science*, vol. 8, pp: 307-309.
28. Modarres, A.; Rahmazadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp: 476-483.

29. Movilla-Quesada, D., Muñoz, O., Raposeiras, A., Castro-Fresno, D. J. C.; *Materials*, B. (2018). Thermal susceptibility analysis of the reuse of fly ash from cellulose industry as contribution filler in bituminous mixtures. Vol. 160, pp: 268-277.
30. Egorova, G; Semukhin, S; Egorov, A; Kachalov, N. (2020). Innovations in the technology for producing asphalt concrete based on neutralized catalyst as a condition for improving the quality of road surfaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 941. 012021. 10.1088/1757-899X/941/1/012021.
31. K.C., Bishow; Bir, Gautam; Tamrakar, Singh. (2020). Utilization of Steel Slag as a Replacement for Filler Material in the Asphalt Concrete.
32. Shuaibu, A. A. H. S. Otuoze, A. Mohammed and M. A. Lateef (2019): "Properties of Asphalt concrete containing Waste foundry Sand (WFS) as Filler material", *ARID Zone Journal of engineering, Technology; Environment (AZOJETE)*, Faculty of Engineering, University of Maiduguri, Maiduguri, Nigeria., September 2019. Vol. 15(3) 662-677.
33. Tahami, S. A., Arabani, M.; Mirhosseini, A. F. (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, vol. 170, pp: 547-556.
34. Aliyu Yaro, Nura Shehu; Sutanto, Muslich; Usman, Aliyu; Jagaba, A. H.; Sakadadi, M. (2022). The Influence of Waste Rice Straw Ash as Surrogate Filler for Asphalt Concrete Mixtures. 2. 118-125. 10.15282/cons.v2i1.7624.
35. Tessema, Amare; Wolelaw, Natnael; Alene, Getachew. (2022). Experimental Evaluation of Coffee Husk Ash as a Filler in Hot Mix Asphalt Concrete Productions. *Advances in Civil Engineering*. 2022. 12. 10.1155/2022/6726700.
36. Rusbintardjo, G.; Hainin, M.R.; Yusoff, N.I.M. Fundamental and rheological properties of oil palm fruit ash modified bitumen. *Constr. Build. Mater.* 2013, 49, 702–711.
37. Agunsoye, J.O.; Bello, S.A.; Azeez, S.O.; Yekinni, A.A.; Adeyemo, R.G. Recycled polypropylene reinforced coconut shell composite: Surface treatment morphological, mechanical and thermal studies. *Int. J. Compos. Mater.* 2014, 4, 168–178.
38. Jack, Favour; Iwo, Edwin. (2022). Dynamic Modulus and Fatigue Life of Corn Starch Modified Bitumen in Asphalt Concrete Pavement. 10. 292-303.
39. Sarir, Muhammad; Khan, Rawid; Alam, Muhammad; Khan, Tariq; Imran, Waheed. (2021). Performance Evaluation of Asphalt Concrete Mixtures Using Bagasse Ash as Filler. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*.
40. Shestakov, Nikolay; Tsyrenzhapov, Vyacheslav; Rosina, Victoria; Komarov, Andrey. (2018). Possibilities of using the dispersed waste of asphalt-concrete plants in the Republic of Buryatia. *MATEC Web of Conferences*. 212. 01011. 10.1051/mateconf/201821201011.
41. Karahancer, Sebnem. (2019). Reçine Kolofan Modifikasyonunun Bitüm ve Sıcak Karışım Asfalt Üzerindeki Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 23. 252-260. 10.19113/sdufenbed.518077.
42. Tenza-Abril, A. J., Saval, J. M.; Cuenca, A. (2015). Using sewage- sludge ash as filler in bituminous mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04014141.
43. Saad, Issa; Sarsam, Saad. (2016). Influence of Nano Material Additives on Dissipated Energy Through the Fatigue Process of Asphalt Concrete. *International Journal of Chemical Engineering and Analytical Science*. 1. 53-59.
44. Tyuryukhanov, Kirill; Pugin, Konstantin; Fedoseeva, Olga; Agapitov, Denis. (2018). Mathematical modeling of the effective composition of asphalt concrete with the use of waste steel production. *Russian journal of transport engineering*. 5. 10.15862/12SATS318.
45. Guo, Zemeng; Chen, Zongwu. (2022). Utilization of Construction Waste Recycled Powder as Filler in Asphalt Concrete. *Materials*. 15. 5742. 10.3390/ma15165742.
46. Lima, M.S.S.; Thives, L.P. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2020, 260, 119894.
47. Bisenov, Kylyshbai; Tanzharikov, Panabek; Sarabekova, Ulbossyn; Kodar, Erden; Abildaev, Nurlan. (2021). The substantiation of the influence of asphalt resin paraffin oil residue on the asphalt concrete technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1030. 012010. 10.1088/1757-899X/1030/1/012010.
48. Фомин А.Ю., Хозин В.Г. Новые серосодержащие материалы для дорожного строительства // *Construction materials*. 2016. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-serosoderzhaschie-materialy-dlya-dorozhnogo-stroitelstva> (дата обращения: 23.03.2023). [Fomin A.Yu., Khozin V.G. New sulfur-

- containing materials for road construction // Construction materials. 2016. Iss. 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-serosoderzhaschie-materialy-dlya-dorozhnogo-stroitelstva> (reference date: 23.03.2023).]
49. Фомин А. Ю., Хафизов Э. Р., Вдовин Е. А., Фафанов Р.Г. Stone mastic asphalt modified with stabilizing additives of multifunctional action // Инженерно-строительный журнал. 2023. No 1. С. 11712-11712. [Fomin A. Yu., Khafizov E. R., Vdovin E. A., Fafanov R.G. Effective stone mastic asphalt with the use of stabilizing additives of multifunctional action // Magazine of Civil Engineering. 2023. Iss. 1. P. 11712-11712]
  50. Гладких Виталий Александрович, Королев Евгений Валерьевич, Хусид Дмитрий Леонидович Стойкость сероасфальтобетонов к образованию колеи // Вестник МГСУ. 2016. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stoykost-seroasfaltobetonov-k-obrazovaniyu-kolei> (дата обращения: 23.03.2023). [Gladkikh V.A., Korolev E.V., Khusid D.L. Resistance of sulfur asphalt concrete to rutting // Vestnik MGSU. 2016. Iss. 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stoykost-seroasfaltobetonov-k-obrazovaniyu-kolei> (reference date: 23.03.2023).]
  51. Fonseca, Mariana; Capitão, Silvino; Almeida, Arminda; Picado Santos, Luis. (2022). Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete. Applied Sciences. 12. 2146. 10.3390/app12042146.
  52. Pamungkas, RA; Bagaskara, C; Prabanto, BA; Rahmat, AN; Pambayun, WB; Anggoro, YS; Setyawan, Ary. (2019). Design and properties of asphalt concrete with various plastic waste in dry processed. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 578. 012079. 10.1088/1757-899X/578/1/012079.
  53. Mikhasek, Andrey; Ivanov, Boris. (2017). Modified composite material developed on the basis of no-fines asphalt concrete. MATEC Web of Conferences. 106. 03022. 10.1051/mateconf/201710603022.
  54. Muhammad, Ashiru; Aliyu, Ibrahim; Sulaiman, Tasiu; Umar, Hussaini; Yasir, Jubril. (2021). Appraisal of Asphalt Concrete with Coal Bottom Ash as Mineral Filler. FUOYE Journal of Engineering and Technology. 6. 10.46792/fuoyejet.v6i2.630.
  55. Pugin K.G.. (2022). The Use of Polymer Materials in the Composition of Asphalt Concrete. 150-155. 10.21741/9781644901755-27.
  56. Singh, M.; Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. Journal of Cleaner Production, vol. 11, No. 2, pp: 620-630.
  57. Bernard Brule and Michel Maze, (1995), "Application of SHRP Binder Tests to the Characterization of Polymer Modified Bitumens." Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp.367-392.
  58. Wegan V., and Brule, B., (1999), "The Structure of Polymer Modified Binders and Corresponding Asphalt Mixtures." Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 68, pp. 112-137
  59. Chen J., and Shiah, M., (2002), "Asphalt Modified by Styrene – Butadiene – Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model." Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.14, pp.12-41.
  60. Lewandowski, L.H., (1994), "Polymer Modification of Paving Asphalt Binders." Rubber Chemistry and Technology, Vol. 67, No. 3, PP. 447-480.
  61. Oksak, Serhii. (2017). Influence of the rubber crumb on the properties of bitum and asphalt concrete. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University.
  62. Al-Samarai, M.A., and Sharma, R.C., (1985), " Improved Asphalts Containing Reclaimed Rubber For Paving Purposes" Republic of Iraq, Ministry of Housing and Construction, National Center For Construction Labs.
  63. Siswanto, Henri; Supriyanto, Bambang; Pranoto,; Candra, Pria; Hakim, Arief. (2017). Marshall properties of asphalt concrete using crumb rubber modified of motorcycle tire waste. AIP Conference Proceedings. 1887. 020039. 10.1063/1.5003522.
  64. Prava, Bidyut; Nayak, Bijaya Bijeta; Satapathy, S.. (2020). Physical and mechanical characterization of composites from waste tire rubber crumb. Materials today: proceedings. 26. 10.1016/j.matpr.2020.02.368.

65. Siswanto, Henri; Supriyanto, Bambang; Pranoto, Ay; Candra, Pria; Hakim, Arief. (2017). Evaluation of moisture damage in asphalt concrete with CRM motorcycle tire waste passing #50 sieve size. AIP Conference Proceedings. 1887. 020075. 10.1063/1.5003558.
66. Sugiyanto, Gito. (2017). Characterization of Asphalt Concrete Produced from Scrapped Tire Rubber. Engineering Journal. 21. 10.4186/ej.2017.21.4.193.
67. Arsam, Saad; Muayad, Samer. (2014). Contribution of Crumb Rubber in the Aging Process of Asphalt Concrete. International Journal of Scientific Research in Knowledge. 2. 404-415. 10.12983/ijsrk-2014-p0404-0415.
68. Аюпов Д.А., Казакулов Р.И., Мурафа А.В. Влияние девулканизаторов резины на пенетрацию битумов // Символ науки. (2015)0. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-devulkanizatorov-reziny-na-penetratsiyu-bitumov> (дата обращения: 18.03.2023). [Аюпов Д.А., Казакулов Р.И., Мурафа А.В. Influence of rubber devulcanizates on bitumen penetration // Symbol of science. (2015)0. Iss. 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-devulkanizatorov-reziny-na-penetratsiyu-bitumov> (reference date: 18.03.2023)]
69. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Казакулов Р.И. Влияние девулканизаторов резины на температуру размягчения битумов // Символ науки. (2015). №7-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-devulkanizatorov-reziny-na-temperaturu-razmyagcheniya-bitumov> (дата обращения: 18.03.2023). [Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Казакулов Р.И. Influence of rubber devulcanizates on the softening point of bitumen // Symbol of Science. (2015). Iss. 7-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-devulkanizatorov-reziny-na-temperaturu-razmyagcheniya-bitumov> (reference date: 18.03.2023)]
70. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Казакулов Р.И. Влияние девулканизаторов резины на фракционный состав битума // Символ науки. (2015). №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-devulkanizatorov-reziny-na-fraktsionnyy-sostav-bituma> (дата обращения: 18.03.2023). [Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Казакулов Р.И. Influence of rubber devulcanizates on the fractional composition of bitumen // Symbol of science. (2015). Iss. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-devulkanizatorov-reziny-na-fraktsionnyy-sostav-bituma> (reference date: 18.03.2023)]
71. Romadhon, Fajar; Iwan, Agata; Karisma, Dwifi; Nastotok, Muhammad; Dewanta, Rendy; Wicaksono, Haris. (2021). Increasing the Stability of Asphalt Concrete Mixture Using Crumb Rubber. E3S Web of Conferences. 328. 10002. 10.1051/e3sconf/202132810002.
72. Msallam, Majed; Asi, Ibrahim. (2018). Improvement of Local Asphalt Concrete Binders Using Crumb Rubber. Journal of Materials in Civil Engineering. 30. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002238.
73. Sidikova T; Barxanadjyan, A; Hakimov, R; Sabirova, D; Mirsaatov, R. (2020). The impact that crushed rubber can have on the quality of bitumen and asphalt concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. 012198. 10.1088/1757-899X/883/1/012198.
74. Hadiwardoyo, Sigit; Aryapijati, R; Sumabrata, R; Iskandar, Dadang. (2020). Temperature Effect on the Deformation of the Recycled Hot-Mix Asphalt Concrete with Nano Crumb Rubber as an Added Material with Wheel Tracking Machine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 811. 012037. 10.1088/1757-899X/811/1/012037.
75. Sousa, J.B., Shatnawi and Cox, J., (1996), "An Approach for Investigating Fatigue Cracking in Asphalt – Aggregate Overlays." Proceeding of the Third International RILEM on Reflective Cracking in Pavements, Delft University of Technology and Belgian Road Research Center, pp103-112.
76. Khattak, M.J., and Baladi, G.Y., (2001), "Fatigue and Permanent Deformation Models for Polymer-Modified Asphalt Mixtures." Presented at the TRB Annual meetings, Washington D.C.
77. Sudhakar, R.K., Raghava, R.K., and Pandey, B.B., (1999), "Cracking in Bituminous Layers Placed over Cracked Pavement, Presented at the TRB Annual meetings, Washington D.C.
78. Yunusa, I.; Abdurrahman, Aliyu; Sulaiman, Tasiu; Muhammad, Ashiru; Aliyu, Ibrahim. (2021). Mechanical Properties of Asphalt Concrete with Crumb Rubber as Partial Replacement for Coarse Aggregate. 28. 75-79.

79. Geremew, Anteneh; Jemal, Abubakir. (2022). The comparative study on the performance of bamboo fiber and sugarcane bagasse fiber as modifiers in asphalt concrete production. *Heliyon*. 8. e09842. 10.1016/j.heliyon.2022.e09842.
80. Assan, Muhammad; Rashid, Muhammad; Danish, Amar; Ahmed, Ahtsham. (2021). The effect of using jute fiber on deformation resistance of asphalt concrete.
81. Rashid, Muhammad; Ahmad, Naveed; Ahmed, Ahtsham. (2020). The effect of using jute fiber on deformation resistance of asphalt concrete.
82. Arabani, M.; Shabani, A. Evaluation of the Ceramic Fiber Modified Asphalt Binder. *Constr. Build. Mater.* 2019, 205, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.037>.
83. Chen, Z.; Yi, J.; Chen, Z.; Feng, D. Properties of Asphalt Binder Modified by Corn Stalk Fiber. *Constr. Build. Mater.* 2019, 212, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.329>.
84. Kim, M.-J.; Kim, S.; Yoo, D.-Y.; Shin, H.-O. Enhancing Mechanical Properties of Asphalt Concrete Using Synthetic Fibers. *Constr. Build. Mater.* 2018, 178, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.070>.
85. Guo, Q.; Li, L.; Cheng, Y.; Jiao, Y.; Xu, C. Laboratory Evaluation on Performance of Diatomite and Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture. *Mater. Des.* 2015, 66, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.033>.
86. Xiong, R.; Fang, J.; Xu, A.; Guan, B.; Liu, Z. Laboratory Investigation on the Brucite Fiber Reinforced Asphalt Binder and Asphalt Concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 83, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.089>.
87. Gao, Ying; Guo, Qinglin; Guo, Yanhua; Wu, Pingchuan; Meng, Wenqing; Jia, Tongye. (2017). Investigation on Reinforced Mechanism of Fiber Reinforced Asphalt Concrete Based on Micromechanical Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. 1-12. 10.1155/2017/4768718.
88. Abdullahi Ahmad, Kabiru; Usman, Nura; Masirin, Mohd; Ahmed, Anwar. (2016). Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre. *Indian Journal of Science and Technology*. Vol 9. 10.17485/ijst/2016/v9i46/107143.
89. Xiang, Q.; Xiao, F. Applications of Epoxy Materials in Pavement Engineering. *Constr. Build. Mater.* 2020, 235, 117529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117529>.
90. Taherkhani, Hasan; Noorian, Farid. (2022). Investigating the Creep and Fatigue Properties of Recycled Asphalt Concrete Containing Waste Engine and Waste Cooking Oil. 10.1007/978-3-030-46455-4\_146.
91. Annisa, Sella; Hadiwardoyo, Sigit; Sumabrata, R; Iskandar, Dadang. (2020). Contribution of Nano Crumb Rubber on Recycled Asphalt Concrete As Pedestrian Paving Block. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 811. 012036. 10.1088/1757-899X/811/1/012036.
92. Yu, Xin; Liu, Quantao; Wan, Pei; Song, Jiangkai; Wang, Huan; Zhao, Feiyang; Wang, Yafei; Wu, Jinyi. (2022). Effect of Ageing on Self-Healing Properties of Asphalt Concrete Containing Calcium Alginate/Attapulgit Composite Capsules. *Materials*. 15. 1414. 10.3390/ma15041414.
93. Wang, Huoming; Yuan, Miao; Wu, Jie; Wan, Pei; Liu, Quantao. (2022). Self-Healing Properties of Asphalt Concrete with Calcium Alginate Capsules Containing Different Healing Agents. *Materials*. 15. 5555. 10.3390/ma15165555.
94. Xu, Shi; Xueyan, Liu; Tabakovic, Amir; Schlangen, Erik. (2019). Investigation of the Potential Use of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing in Porous Asphalt Concrete. *Materials*. 12. 10.3390/ma12010168.
95. Wang, Haopeng. (2016). Design and Evaluation of Conductive Asphalt Concrete for Self-Healing.
96. Messaoud, M.; Glaoui, Bachir; Abdelkhalek, Othmane. (2022). The Effect of Adding Steel Fibers and Graphite on Mechanical and Electrical Behaviors of Asphalt Concrete. *Civil Engineering Journal*. 8. 348-361. 10.28991/CEJ-2022-08-02-012.
97. Zadri, Ziane; Glaoui, Bachir; Abdelkhalek, Othmane. (2022). Enhancement of Electrical and Mechanical Properties of Modified Asphalt Concrete with Graphite Powder. *Civil Engineering Journal*. 8. 124-133. 10.28991/CEJ-2022-08-01-09.



98. Liu, Xiaoming; Zhihong, Nie; Wu, Shaopeng; Wang, Cui. (2015). Self-monitoring application of conductive asphalt concrete under indirect tensile deformation. *Case Studies in Construction Materials*. 3. 10.1016/j.cscm.2015.07.002.
99. Ceylan, Halil; Arabzadeh, Ali; Kim, Sunghwan; Sassani, Alireza; Gopalakrishnan, Kasthurirangan; Notani, Mohammad ali. (2021). Electrically-conductive asphalt concrete containing carbon fibers.
100. Ahmad, Mushtaq; Al-Dala'ien, Rayah; Beddu, Salmia; Itam, Zarina. (2021). Thermo-Physical Properties of Graphite powder and Polyethylene Modified Asphalt Concrete. *Engineered Science*. 10.30919/es8d569.
101. Hechuan, Li; Yu, Jianying; Wu, Shaopeng; Liu, Quantao; Li, Yuanyuan; Wu, Yaqi; Xu, Haiqin. (2019). Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete. *Materials*. 12. 1067. 10.3390/ma12071067.
102. Gürer, Cahit; Gürgöze, Hüseyin. (2007). Investigation the Characteristics of Conductive Asphalt Concrete with Carbon Fibre. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3297. 57-63.
103. García, Alvaro; Norambuena-Contreras, José; Bueno, Moises; Partl, Manfred. (2014). Influence of Steel Wool Fibers on the Mechanical, Termal, and Healing Properties of Dense Asphalt Concrete. *Journal of Testing and Evaluation*. 42. 1107-1118. 10.1520/JTE20130197.
104. García, Alvaro; Norambuena-Contreras, José; Partl, Manfred. (2013). A parametric study on the influence of steel wool fibers in dense asphalt concrete. *Materials and Structures*. 10.1617/s11527-013-0135-0.
105. Deng, Yue; Ma, Jianmin; Lu, Tong; Sun, Daquan. (2021). Enhanced heating-healing performance of asphalt concrete modified with heterogenous microwave sensitive admixtures. *Construction and Building Materials*. 299. 10.1016/j.conbuildmat.2021.123949.
106. Pan, Pan; Wu, Shaopeng; Hu, Xiaodi; Liu, Gang; li, bo. (2017). Effect of Material Composition and Environmental Condition on Thermal Characteristics of Conductive Asphalt Concrete. *Materials*. 10. 218. 10.3390/ma10030218.
107. Sun, Jian; Bieliatynskyi, Andrii; Krayushkina, Kateryna; Akmalidina, Oleksandra. (2020). Research of properties on graphite conductive slag in asphalt concrete. *E3S Web of Conferences*. 175. 11015. 10.1051/e3sconf/202017511015.

#### **Информация об авторах**

**Алексей Александрович Игнатъев**, Начальник управления развития отраслевого образования, ФАУ «РОСДОРНИИ», г. Москва, Российская Федерация. Доцент, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Российская Федерация.

Email: Ignatievaa@rosdornii.ru

#### **Information about the authors**

**Alexey A. Ignatyev**, Head of the Department of Industry Education Development, FAI "ROSDORNII", Moscow, Russian Federation. Associate Professor, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation.

Email: Ignatievaa@rosdornii.ru