
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ/DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS,
BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.78> EDN: BROFYI**ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДБОРА СОСТАВОВ АСФАЛЬТОБЕТОНА: ОТ КЛАССИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ СИСТЕМАМ**

Обзор

Никитаев М.М.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0003-2256-8676;¹ Автомобильные дороги, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mn[at]inbox.ru)

Предложена: 11.04.2026; Принята: 09.07.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

В статье анализируются методы проектирования составов асфальтобетонных смесей с учетом особенностей непрерывной и прерывистой гранулометрии минеральной части. Представлена структурная схема процесса проектирования состава асфальтобетонной смеси и показано, что для правильного подбора состава смеси необходимо учитывать погодные-климатические условия региона и параметры транспортной нагрузки. Приведен обзор наиболее распространенных отечественных программных решений для автоматизированного проектирования асфальтобетонных смесей. Показано, что автоматизация проектирования состава асфальтобетона значительно снижает затраты и ускоряет процесс, а также обеспечивает высокую однородность на стадии проектирования. Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков зарубежного программного обеспечения для выбора состава смеси и представлены современные тенденции в процессе автоматизации проектирования асфальтобетонных смесей, предполагающие использование методов интеллектуального анализа данных для учета множества факторов, климатических условий, интенсивности транспортных потоков и прогнозирования срока службы покрытия при использовании спроектированных составов.

Ключевые слова: автоматизация, асфальтобетонная смесь, состав, программное обеспечение, производство, автомобильные дороги.

**DIGITALIZATION OF ASPHALT CONCRETE COMPOSITION SELECTION PROCESSES: FROM CLASSICAL
METHODS TO INTELLIGENT SYSTEMS**

Review article

Nikitaev M.M.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0003-2256-8676;¹ Automobile roads, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (mn[at]inbox.ru)

Suggested: 11.04.2026; Accepted: 09.07.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

The article analyzes the methods of designing the compositions of asphalt concrete mixtures, taking into account the features of continuous and discontinuous granulometry of the mineral part. A structural diagram of the process of designing the composition of an asphalt concrete mixture is presented, and it is shown that in order to correctly select the composition of the mixture, it is necessary to take into account the weather and climatic conditions of the region and the parameters of transport load. An overview of the most common domestic software solutions for automated design of asphalt concrete mixtures is provided. It is shown that the automation of designing the composition of asphalt concrete significantly reduces costs and speeds up the process and also ensures high homogeneity at the design stage. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of foreign software for selecting the composition of the mixture has been conducted, and modern trends in the process of automating the design of asphalt concrete mixtures have been presented, which involve the use of data mining methods to take into account a variety of factors, climatic conditions, traffic intensity, and the prediction of the service life of the road surface using the developed compositions.

Keywords: automation, asphalt concrete mixture, composition, software, production, roads.

Введение

Современное дорожное строительство сталкивается с необходимостью перехода от традиционных эмпирических методов к цифровым и интеллектуальным решениям. Рост интенсивности движения, увеличение осевых нагрузок и изменение климатических условий предъявляют к процессу проектирования состава асфальтобетонной смеси (АБС) особые требования, так как от этого напрямую зависит долговечность и безопасность дорожных покрытий. Традиционные ручные методы подбора, основанные на формулах и таблицах, являются трудоемкими, требуют высокой квалификации специалиста и зачастую не позволяют в полной мере учесть многовариантность исходных материалов. Необходимость систематизации существующих программных средств для проектирования составов АБС,

выявления их функциональных ограничений и определения направлений развития программных средств, способных не только автоматизировать расчеты, но и прогнозировать эксплуатационные свойства будущего покрытия на этапе проектирования, определяет актуальность настоящего исследования.

Автоматизация подбора состава АБС развивается по двум взаимодополняющим направлениям. Первое состоит в цифровизации традиционного объемно-структурного проектирования, включая расчет дозировок, контроль ограничений по пустотности, формирование протоколов, а второе направление обеспечивает прогноз эксплуатационных показателей (колееобразование, усталостное разрушение, трещиностойкость) на основе эмпирических подходов.

Вопросы оптимизации и автоматизации проектирования составов АБС широко освещены как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе. Классические методы, такие как метод Маршалла, остаются базой для многих национальных стандартов [1]. Современные исследования подчеркивают, что подбор состава должен быть адаптирован к конкретным условиям эксплуатации, а не только к требованиям прочности [2].

Вопросы автоматизации и интеллектуализации подбора составов АБС активно исследуются как в России, так и за рубежом. Основы проектирования, заложенные еще в начале XX века, сегодня дополняются методологией Superpave и проектированием сбалансированной смеси (Balanced Mix Design — BMD) [3]. Современные зарубежные исследователи указывают на переход от чисто лабораторных методов к использованию искусственного интеллекта (AI) для создания климатически устойчивых смесей [4], [5], [6]. Применение машинного обучения (Machine Learning) и генетических алгоритмов позволяет оптимизировать многообъективные задачи проектирования, учитывая одновременно стоимость, экологический след и технические характеристики [7]. В отечественной практике значительный вклад в развитие расчетных методов внесли работы коллективов МАДИ и профильных институтов, направленные на исследование структурно-механических свойств АБС и разработку программных комплексов [1], [8]. Однако, несмотря на наличие ряда программных продуктов, остается открытым вопрос создания единой интеллектуальной среды, связывающей свойства компонентов с прогнозным сроком службы покрытия в конкретных климатических условиях [9].

Анализ существующих методов проектирования АБС выявляет их специфические недостатки, что обосновывает необходимость внедрения средств автоматизации. Диссертационные исследования, посвященные данной теме, показывают, что эффективная автоматизация базируется на фундаментальных материаловедческих принципах расчета состава и стабилизации свойств смеси. Однако, как показывает практика, большинство существующих подходов либо полностью эмпиричны, либо не интегрированы в единую цифровую среду проектирования. Таким образом, наблюдается разрыв между накопленной теоретической базой и современными возможностями вычислительной техники и искусственного интеллекта. Целью настоящего исследования является сравнительный анализ существующих программных средств для проектирования составов АБС, выявление их функциональных ограничений и формулирование требований к интеллектуальным системам нового поколения. Для достижения поставленной цели необходимо структурировать основные этапы проектирования состава АБС с точки зрения возможности их автоматизации, провести классификацию существующих программных решений (как отечественных, так и зарубежных) по функциональным признакам и методам расчета, выявить преимущества и недостатки рассмотренных программных продуктов и сформулировать требования к перспективным интеллектуальным системам подбора состава АБС, основанным на методах машинного обучения и прогнозного моделирования.

Процесс проектирования состава АБС целесообразно структурировать в виде трёх последовательных этапов. На первом этапе выполняется оценка свойств минеральных материалов и битума с верификацией их показателей на соответствие требованиям, закреплённым в соответствующих технических регламентах и нормативных документах. На втором этапе определяется оптимальное соотношение исходных компонентов, обеспечивающее получение АБС с заданными характеристиками. В особых случаях дополнительно проводятся сопоставительные исследования и испытания АБС с применением нестандартных методик. Это позволяет выявить наиболее долговечный и эффективный состав с точки зрения эксплуатационных свойств. На заключительном этапе рекомендуется выполнить технико-экономическое сравнение разработанных вариантов составов АБС и провести их апробацию на асфальтобетонном заводе.

Лабораторные испытания позволяют оценить эксплуатационные свойства АБС в реальных дорожно-эксплуатационных условиях, включая: сдвигустойчивость (через прогноз остаточной деформации за расчётный срок службы), трещиностойкость, колееобразование, эрозионную и морозостойкость, а также усталостную долговечность (рисунок 1).

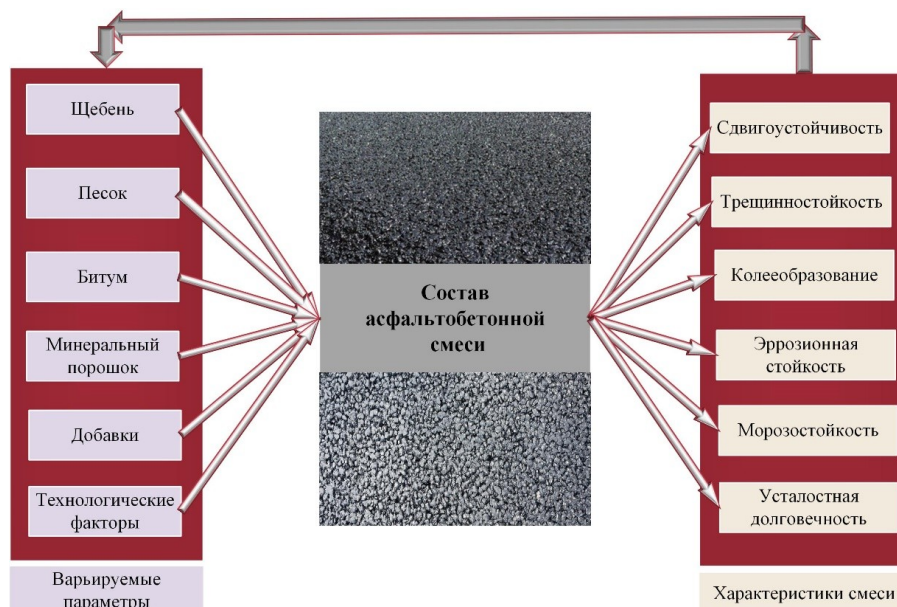


Рисунок 1 - Итерационный характер процесса проектирования состава асфальтобетонных смесей
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.78.1>

Автоматизация позволяет снизить вероятность ошибок при пересчете дозировок и объемных характеристик, уменьшить количество итераций подбора, обеспечить сопоставимость результатов между лабораториями, выполнить прогноз эксплуатационных характеристик.

Методы и модели

В отечественной практике наиболее распространён метод проектирования по предельным кривым зернового состава асфальтобетонной смеси. Согласно этому методу, процентное содержание каждой фракции минеральной части должно находиться в диапазоне между предельными кривыми. Такой подход определяет структурно-механические свойства смеси, обеспечивает прочность и долговечность дорожного полотна и способствует снижению производственных затрат. Количество добавляемого битума подбирается таким образом, чтобы итоговые структурно-механические свойства АБС соответствовали установленным нормативным требованиям.

Проектирование состава АБС с учётом структурно-механических свойств представляет собой трудоёмкий и продолжительный процесс. Он сопряжён с необходимостью многократного проведения испытаний и последующей корректировки рецептуры смеси. Существенное усложнение задачи обусловлено широким ассортиментом типов, видов и марок асфальтобетонных смесей, а также разнообразием исходных материалов, используемых на асфальтобетонных заводах (АБЗ). В связи с этим уже длительное время ведутся работы по автоматизации данного процесса с применением средств компьютерной поддержки. Переходя к классификации программных средств, можно выделить следующие классы программных решений.

1. Специализированные решения объемного проектирования (volumetric design). Это программы, которые автоматизируют расчеты состава и контроль требований стандартов (например, PaveXpress, Asbet) с акцентом на удобный рабочий процесс: ввод материалов и результатов испытаний, расчет объемных показателей, проверка ограничений спецификаций, выпуск отчета по смеси. Это «быстрый» инструмент для типовых задач и стандартизации процессов в лабораториях. Достоинствами являются автоматический расчет основных объемных характеристик (пустотность, VMA/VFA и т. п.), снижение риска ошибок при ручных пересчетах и переносе данных.

2. Инструменты проектирования сбалансированного состава смеси BMD (balanced mix design): программная поддержка как связка калькуляторов и базы данных испытаний. BMD — это не одна программа, а методология, в которой состав принимается на основании сбалансированного выполнения критериев по колееобразованию и трещиностойкости. Программная поддержка чаще всего реализуется через расчетные формы и базы данных результатов испытаний, специализированные калькуляторы показателей отдельных тестов, а также правила принятия решений. К их достоинствам относится прямая привязка состава к эксплуатационным рискам.

3. Инструменты выбора вяжущего с использованием апробированной методологии и климатических баз данных, что позволяет более обоснованно выбирать вяжущее для данного региона и заданного уровня надежности с последующим подбором состава АБС. Корректность результатов зависит от релевантности климатических данных и принятого уровня надежности.

4. Специализированные комплексы проектирования дорожной одежды с генерацией и сравнением альтернативных составов смесей по прогнозу повреждений. Они позволяют связать выбор АБС с прогнозом повреждений и сроком службы и поддерживают сценарное сравнение составов в контексте реальных нагрузок и климата.

5. Табличные калькуляторы и оптимизационные модели — это наиболее массовый на практике класс автоматизации. Организации создают шаблоны, которые считают дозировки фракций (в том числе с учетом влажности), рассчитывают объемные показатели по результатам испытаний, проверяют ограничения стандартов и формируют протоколы.

Марка битумного вяжущего определяется по интервалу работоспособности — диапазону между минимальной и максимальной расчётными температурами покрытия в зоне строительства. При этом требования к деформируемости и вязкоупругим свойствам остаются неизменными, а корректируется только температурный диапазон их выполнения. Необходимость внедрения Supergravel связана с недостатками действующих стандартов, где нормируемые характеристики (глубина проникания иглы, температуры размягчения и хрупкости) носят эмпирический характер, а сами битумы пригодны лишь для определённых климатических условий.

Основные результаты

Среди отечественных разработок существует несколько программ для автоматизированного проектирования состава АБС, которые позволяют оптимизировать процесс подбора компонентов, учитывать нормативные требования и экономические факторы. Рассмотрим некоторые из них, их достоинства и недостатки. Простотой и понятностью отличается программа Granlab [10].

Программа ТИМ КРЕДО РАДОН 4.1 [11] выделяется среди аналогичных решений своей функциональной полнотой. Программа находит широкое применение в проектной практике дорожного строительства и позволяет проектировать дорожные одежды на этапе создания новых автомобильных дорог, их реконструкции и усиления с целью повышения несущей способности и продления срока службы покрытий.

Автоматизированные расчёты, реализуемые в рамках этой программы, обеспечивают проектировщикам высокую скорость выполнения задач и повышенную точность получаемых результатов.

Программа автоматизированного проектирования Robur [12] применяется для расчёта составов АБС на АБЗ. Она обеспечивает подбор рецептуры под различные типы покрытий (дороги, аэродромы, городские улицы). Основные возможности: генерация до 10 000 вариантов смеси по заданным параметрам (класс, вид, группа, тип зернового состава), оптимизация по двум критериям — плотность укладки зёрен и стоимость минеральной части, расчет расхода материалов на тонну АБС и их стоимости. К недостаткам можно отнести отсутствие возможности учёта некоторых специфических факторов (например, нелинейных свойств вяжущих или влияния климатических условий на долгосрочную стабильность смеси) и детальный ввод исходных данных о материалах и нормативных требованиях, что может быть трудоёмким для пользователя.

Удачной следует считать программу QUICK, в которой кроме стандартного функционала ускоренного подбора составов АБС заявлен прогноз эксплуатационного состояния покрытия.

Разработанная в МАДИ программа для автоматизированного проектирования состава асфальтобетона ASBET [8] учитывает характеристики исходных материалов (щебень, песок, минеральный порошок, битум) и позволяет автоматически рассчитывать значения полных остатков на ситах и пустотности. В базе данных заложены битумоёмкости различных горных пород на основе теоретических и экспериментальных работ.

Программа Asbet позволяет выбрать регрессионную модель, включая модели линейной и нелинейной регрессии, с возможностью устранения невязок с использованием различных методов Этона, Титъена-Мура-Бекмана, Прескотта-Лунда, Кука и вычисления коэффициентов уравнения регрессии (рисунок 2). Эта программа постоянно совершенствуется и на сегодняшний день обладает развитым функционалом и широкими возможностями построения и анализа графиков (рисунок 3).

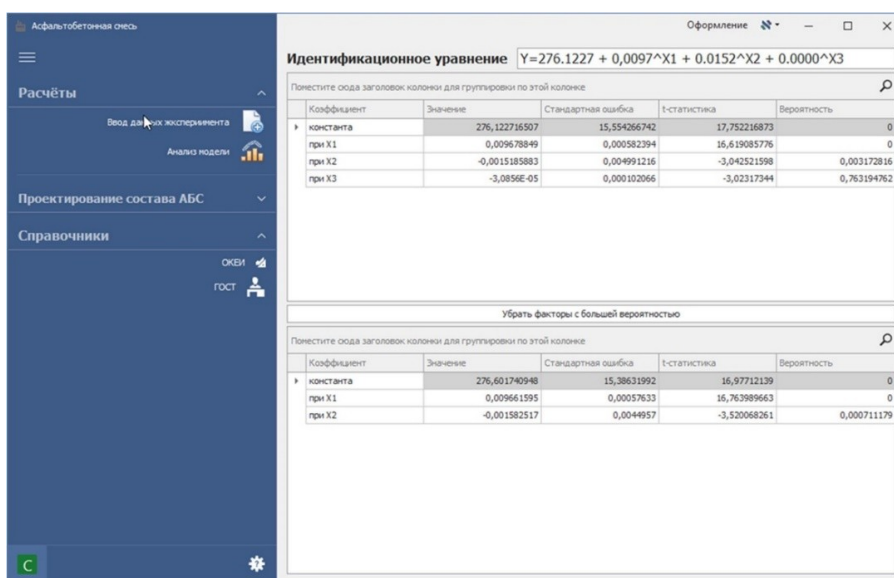


Рисунок 2 - Окно работы с уравнением регрессии

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.78.2>

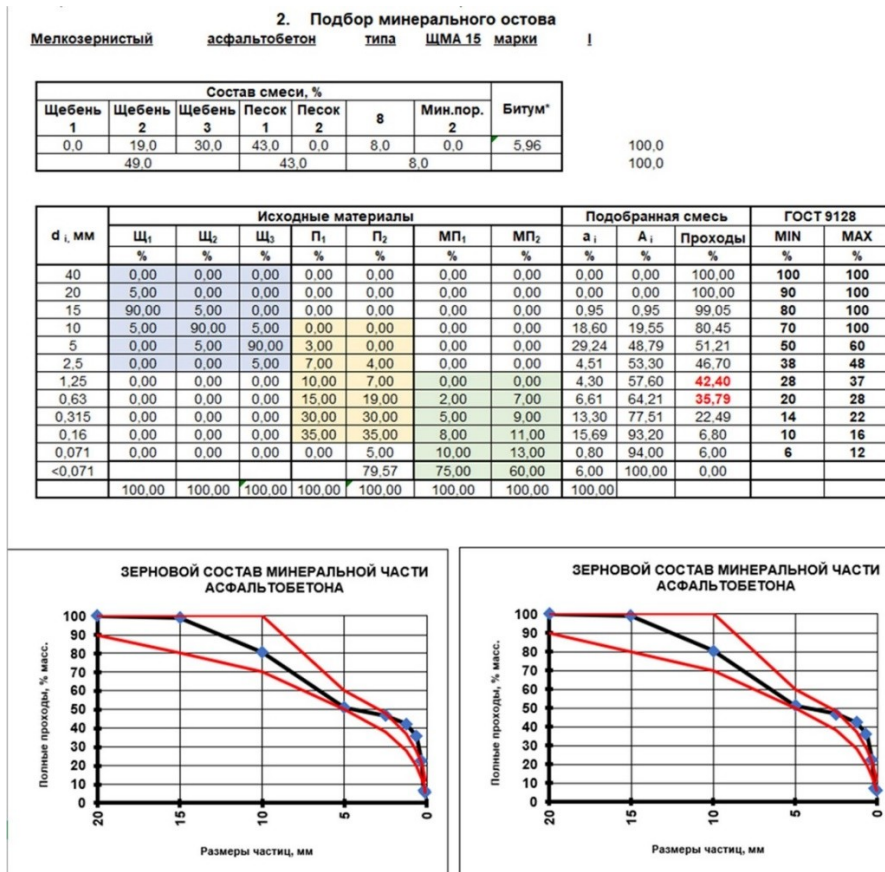


Рисунок 3 - Визуализация расчетов зернового состава минеральной части асфальтобетона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.78.3>

К недостаткам можно отнести большой объем ручного ввода множества параметров, что повышает риск ошибок.

Сравнительный анализ достоинств и недостатков зарубежного программного обеспечения приведен в Таблице 1 [13], [14], [15], [17].

Таблица 1 - Характеристики зарубежного программного обеспечения подбора состава смеси и проектирования дорожной одежды

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.78.4>

Программа	Назначение	Достоинства	Недостатки
PaveXpress	Автоматизация подбора состава смеси по объемным показателям (по Superpave)	Скорость, стандартизация, отчеты	Привязка к AASHTO; не учитывает все эксплуатационные показатели
LTPPBind	Выбор температурных параметров PG-деградации вяжущего по климату	Обоснованный выбор PG	Не подбирает гранулометрический состав/ битумоемкость
Pavement ME Design	Проектирование дорожных одежд с прогнозом повреждений	Связь со сроком службы, сравнение составов с учетом нагрузок и климата	Сложность, стоимость, высокие требования к исходным данным
CalME	Проектирование дорожной одежды и сравнение альтернативных составов	Полезен для сравнения вариантов конструкции дороги и свойств смеси	Региональная применимость, требуется подбор состава по стандартам
MnPAVE	Проектирование дорожной одежды и сравнение альтернативных	Обоснованный выбор смеси для конкретных условий эксплуатации	Региональная применимость, высокие требования к исходным данным

Программа	Назначение	Достоинства	Недостатки
	составов		
Excel/Mathcad шаблоны	Автоматизация под локальные нормы	Гибкость, дешевизна, возможность оптимизации состава	Риски ошибок, локальность данных
BMD-инструменты (набор)	Проектирование состава смеси по критериям колебательности и трещиностойкости	Прямая привязка состава к эксплуатационным рискам	Фрагментация ПО, региональные критерии и граничные значения

Последовательное решение поставленных задач позволило провести классификацию существующих программных средств по функциональным признакам и методам расчета, выявить их преимущества и недостатки, предложить комплексную пятиуровневую классификацию ПО для подбора АБС, которая позволяет осуществлять обоснованный выбор инструментов в зависимости от решаемых задач.

Заключение

В ходе исследования проанализированные программные решения были распределены по пяти функциональным группам:

- (1) системы объемного проектирования,
- (2) системы оптимизации зернового состава,
- (3) системы расчета физико-механических свойств,
- (4) системы прогнозирования эксплуатационных характеристик,
- (5) системы с элементами искусственного интеллекта (AI).

Установлено, что большинство отечественных программных продуктов (Granlab, Robur, ASBET) успешно автоматизируют расчеты по действующим ГОСТам, но функции прогнозирования долговечности, усталостной трещиностойкости и колебательности реализованы только в единичных решениях или отсутствуют вовсе. Зарубежное ПО (Pavement ME Design) предлагает более продвинутые прогнозные модели, но ориентировано на иные нормативные базы и климатические условия.

Обоснована необходимость перехода от эмпирических и полуэмпирических моделей к технологиям искусственного интеллекта, что позволит не только подбирать состав АБС по заданным параметрам, но и вычислять прогнозируемый срок службы покрытия с учетом вариативности сырья [18], [19], [20].

Таким образом, в рамках данного исследования проведен анализ актуального состояния цифровизации процессов подбора составов АБС. Результаты показывают, что, несмотря на наличие значительного количества программных продуктов, отечественный рынок нуждается в решениях, способных не только автоматизировать расчеты, но и прогнозировать поведение покрытия в реальных условиях.

Внедрение автоматизированных расчетов даёт проектировщикам инструмент для точного подбора свойств исходных материалов и быстрой корректировки составов асфальтобетонных смесей. Использование программ автоматизации проектирования состава АБС существенно снижает трудоемкость процесса проектирования, его стоимость, обеспечивает высокую степень однородности уже на стадии проектирования состава.

Следует подчеркнуть, что представленный перечень программных решений для проектирования составов АБС носит обзорный характер и не охватывает все доступные на рынке продукты. Необходимость практического применения подобных программных средств определяет актуальность совершенствования существующего и разработки нового программного обеспечения.

Современные тенденции в автоматизации проектирования АБС состоят в прогнозировании свойств готовой смеси с учётом вариаций параметров компонентов и технологического процесса, интеграции с системами управления производством для обеспечения единого информационного потока и повышения эффективности работы предприятия и использовании методов интеллектуального анализа данных для учета множества факторов, климатических условий, интенсивностей транспортных потоков и прогнозирования срока службы покрытия.

Благодарности

Научному консультанту Васильеву Юрию Эммануиловичу, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой «Дорожно-строительные материалы и химические технологии» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The author expresses their gratitude to Vasilyev Yuri Emmanuilovich, Doctor of Technical Sciences, Professor and Head of the 'Road Construction Materials and Chemical Technologies' Faculty at the Moscow State Automobile and Road Construction Technical University (MADI).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Кирюхин Г.Н. Проектирование составов асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. — Москва: Инфра-Инженерия, 2023. — 204 с. — ISBN 978-5-9729-1286-5.
2. Афанасенко А.А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности / А.А. Афанасенко // Наука и техника. — 2024. — Т. 23, № 3. — С. 235–241. — DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241.
3. Liu J. Acceleration of Superpave Mix Design: Solving Multi-Objective Optimization Problems Using Machine Learning and the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II / J. Liu, F. Liu, L. Wang // Transportation Research Record. — 2024. — Vol. 2678. — № 11. — P. 1863–1886.
4. Zhang K. Climate-resilient epoxy asphalt mixture design: An intelligent framework / K. Zhang, Y. Li, X. Wang [et al.] // Advanced Engineering Informatics. — 2025. — Vol. 65. — P. 103395.
5. Liu J. Transitioning from Lab-Based to AI-Assisted Balanced Mix Design: Comprehensive Overview of Research, Development, and Future Perspectives / J. Liu, S. Chen, M. Zhang [et al.] // Transportation Research Record. — 2025. — Vol. 2679, № 7. — P. 29–63.
6. Wang J. Optimization of asphalt mix design considering mixture performance, environmental impact, and life cycle cost / J. Wang, L. Zhang, H. Wu [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2025. — Vol. 512. — P. 145618.
7. Tong B. Machine Learning-Based Prediction and Optimization of Balanced Mixture Design Performance Indices / B. Tong, Y. Zhao, Q. Liu [et al.] // Transportation Research Record. — 2025. — Vol. 2679. — № 7. — P. 156–173.
8. Кочнев В.И. Автоматизированная программа проектирования состава асфальтобетонных смесей с требуемыми структурно-механическими свойствами. Часть 1. Блок исходных данных / В.И. Кочнев, Э.В. Котляровский // Материалы для дорожного строительства. — 2011. — № 10. — С. 5–9.
9. Hamed G.H. Investigating the effect of fundamental properties of materials on the mechanisms of thermal cracking of asphalt mixtures / G.H. Hamed, A.H. Asadi, J. Zarrinfam // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 411. — P. 134426.
10. Dorsoft. — URL: <https://dorsoft.ru> (accessed: 07.07.2026).
11. ТИМ КРЕДО РАДОН // Технологии CREDO. — URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/193-credo-radon-ru-naznachenie.html> (дата обращения: 07.07.2026).
12. NeoCAD. — URL: <https://neocad.ru/> (accessed: 07.07.2026).
13. FHWA LTPP Bind. — URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/ltpbind> (accessed: 07.07.2026).
14. AASHTOWare. — URL: <https://www.aashtoware.org> (accessed: 07.07.2026).
15. MnPAVE. — URL: <https://www.dot.state.mn.us/materials/mnpave> (accessed: 07.07.2026).
16. ASTM International. — URL: <https://www.astm.org> (accessed: 07.07.2026).
17. National Asphalt Pavement Association. — URL: <https://www.asphaltpavement.org> (accessed: 07.07.2026).
18. Cui B. Coupled prediction of viscoelastic properties of asphalt mixtures using a multi-task physics-constrained neural network / B. Cui, H. Wang // Advanced Engineering Informatics. — 2026. — Vol. 72. — P. 104437.
19. Liu Z. Development of field compaction curves for asphalt mixtures based on laboratory workability tests and machine learning modeling / Z. Liu, J. Li, T. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 479. — P. 141520.
20. Peng L. Hybrid machine learning and multi-objective optimization for intelligent design of green and low-carbon concrete / L. Peng, Y. Chen, H. Zhang [et al.] // Sustainable Materials and Technologies. — 2025. — Vol. 45. — P. e01605.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kirjuhin G.N. Proektirovanie sostavov asfal'tobetona [Design of asphalt concrete compositions] / G.N. Kirjuhin, E.A. Smirnov. — Moscow: Infra-Engineering, 2023. — 204 p. — ISBN 978-5-9729-1286-5. [in Russian]
2. Afanasenko A.A. Optimizacija zernovogo sostava asfal'tobetonnyh smesej s cel'ju obespechenija maksimal'noj plotnosti [Optimization of grain composition of asphalt concrete mixtures to ensure maximum density] / A.A. Afanasenko // Nauka i tehnika [Science and Technology]. — 2024. — Vol. 23, № 3. — P. 235–241. — DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241. [in Russian]
3. Liu J. Acceleration of Superpave Mix Design: Solving Multi-Objective Optimization Problems Using Machine Learning and the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II / J. Liu, F. Liu, L. Wang // Transportation Research Record. — 2024. — Vol. 2678. — № 11. — P. 1863–1886.
4. Zhang K. Climate-resilient epoxy asphalt mixture design: An intelligent framework / K. Zhang, Y. Li, X. Wang [et al.] // Advanced Engineering Informatics. — 2025. — Vol. 65. — P. 103395.
5. Liu J. Transitioning from Lab-Based to AI-Assisted Balanced Mix Design: Comprehensive Overview of Research, Development, and Future Perspectives / J. Liu, S. Chen, M. Zhang [et al.] // Transportation Research Record. — 2025. — Vol. 2679, № 7. — P. 29–63.
6. Wang J. Optimization of asphalt mix design considering mixture performance, environmental impact, and life cycle cost / J. Wang, L. Zhang, H. Wu [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2025. — Vol. 512. — P. 145618.
7. Tong B. Machine Learning-Based Prediction and Optimization of Balanced Mixture Design Performance Indices / B. Tong, Y. Zhao, Q. Liu [et al.] // Transportation Research Record. — 2025. — Vol. 2679. — № 7. — P. 156–173.



8. Kochner V.I. Avtomatizirovannaja programma proektirovanija sostava asfal'tobetonnyh smesej s trebuemymi strukturno-mehanichesкими svojstvami. Chast' 1. Blok ishodnyh dannyh [Automated program for designing asphalt concrete mixtures with required structural and mechanical properties. Part 1. Initial data block] / V.I. Kochner, Je.V. Kotljarskij // Materialy dlja dorozhnogo stroitel'stva [Materials for Road Construction]. — 2011. — № 10. — P. 5–9. [in Russian]
9. Hamedi G.H. Investigating the effect of fundamental properties of materials on the mechanisms of thermal cracking of asphalt mixtures / G.H. Hamedi, A.H. Asadi, J. Zarrinfam // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 411. — P. 134426.
10. Dorsoft. — URL: <https://dorsoft.ru> (accessed: 07.07.2026).
11. TIM KREDO RADON // Tekhnologii CREDO [CREDO Technologies]. — URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/193-credo-radon-ru-naznachenie.html> (accessed: 07.07.2026). [in Russian]
12. NeoCAD. — URL: <https://neocad.ru/> (accessed: 07.07.2026).
13. FHWA LTPP Bind. — URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/ltpbind> (accessed: 07.07.2026).
14. AASHTOWare. — URL: <https://www.aashtoware.org> (accessed: 07.07.2026).
15. MnPAVE. — URL: <https://www.dot.state.mn.us/materials/mnpave> (accessed: 07.07.2026).
16. ASTM International. — URL: <https://www.astm.org> (accessed: 07.07.2026).
17. National Asphalt Pavement Association. — URL: <https://www.asphaltpavement.org> (accessed: 07.07.2026).
18. Cui B. Coupled prediction of viscoelastic properties of asphalt mixtures using a multi-task physics-constrained neural network / B. Cui, H. Wang // Advanced Engineering Informatics. — 2026. — Vol. 72. — P. 104437.
19. Liu Z. Development of field compaction curves for asphalt mixtures based on laboratory workability tests and machine learning modeling / Z. Liu, J. Li, T. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 479. — P. 141520.
20. Peng L. Hybrid machine learning and multi-objective optimization for intelligent design of green and low-carbon concrete / L. Peng, Y. Chen, H. Zhang [et al.] // Sustainable Materials and Technologies. — 2025. — Vol. 45. — P. e01605.