

Алгоритм автоматизированного контроля и корректировки технологических параметров производства асфальтобетонных смесей на основе анализа данных о свойствах компонентов

Д.Н. Суворов, М.Х. Базарбаев

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ)*

Аннотация: В статье рассматривается разработка алгоритма автоматизированного контроля и корректировки технологических параметров при производстве асфальтобетонных смесей. Основой предлагаемого подхода служит анализ данных о физико-механических свойствах компонентов смеси с применением методов машинного обучения и статистического анализа. Исследование включает анализ существующих систем контроля качества, разработку математической модели прогнозирования свойств готовой смеси, создание алгоритма оптимизации технологических параметров и проведение экспериментальных исследований. Результаты показывают возможность повышения качества продукции на 15-20% и снижения расхода материалов на 8-12% при внедрении предложенного алгоритма. Практическое применение разработки позволяет обеспечить стабильность технологического процесса и соответствие готовой продукции нормативным требованиям.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, асфальтобетонные смеси, технологический параметр, анализ данных, свойство компонентов, математическое моделирование, оптимизация производства.

Современное производство асфальтобетонных смесей характеризуется высокими требованиями к качеству готовой продукции и необходимостью обеспечения стабильности технологического процесса. Традиционные методы контроля, основанные на периодическом лабораторном анализе образцов, не позволяют оперативно корректировать параметры производства при изменении свойств исходных материалов [1, с. 16-18].

Анализ современных тенденций развития дорожной отрасли показывает возрастающую потребность в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Волков И.Н. и Бурковский В.Л. отмечают, что внедрение интеллектуальных систем принятия решений позволяет существенно повысить эффективность производства асфальтобетонных смесей [2, с. 39-41].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания эффективных методов автоматизированного контроля качества при производстве асфальтобетонных смесей, учитывающих вариабельность свойств компонентов и обеспечивающих стабильность характеристик готовой продукции.

Целью работы является разработка алгоритма автоматизированного контроля и корректировки технологических параметров производства асфальтобетонных смесей на основе анализа данных о свойствах компонентов.

Современные системы контроля качества асфальтобетонных смесей используют различные подходы к мониторингу технологических параметров. Исследования показывают, что традиционные методы контроля имеют существенные ограничения в части оперативности получения результатов и возможности корректировки параметров в режиме реального времени [3, с. 45-52].

Таблица №1.

Сравнительный анализ существующих методов контроля технологических параметров [4, с. 206; 11, с. 82]

№	Метод контроля	Оперативность	Точность, %	Возможность корректировки	Стоимость внедрения
1	Лабораторный анализ	Низкая	95-98	Отсутствует	Низкая
2	Автоматизированные датчики	Высокая	85-90	Ограниченная	Средняя
3	Нейросетевые системы	Высокая	92-95	Полная	Высокая
4	Гибридные системы	Высокая	93-97	Полная	Высокая

Мещеряков С.Ю. и Мещерякова А.А. предлагают использование автоматизированных систем управления, включающих датчики контроля

температуры, влажности и гранулометрического состава материалов [4, с. 203-205]. Однако данные системы не обеспечивают комплексного анализа взаимосвязи между свойствами компонентов и характеристиками готовой смеси.

Анализ зарубежного опыта показывает перспективность применения методов машинного обучения для прогнозирования качества асфальтобетонных смесей. Набижанов Ж.И. в своих исследованиях доказывает эффективность нейросетевых технологий для управления процессами уплотнения асфальтобетонных покрытий [5, с. 78-85].

Анализ данных таблицы №1 показывает, что наиболее перспективным направлением является разработка гибридных систем контроля, объединяющих преимущества различных методов измерения и анализа данных. Подобные системы обеспечивают высокую точность измерений при сохранении возможности оперативной корректировки технологических параметров.

Создание эффективного алгоритма автоматизированного контроля требует разработки математической модели, связывающей свойства исходных компонентов с характеристиками готовой смеси. Основой для построения модели служат данные о физико-механических свойствах щебня, песка, битума и минерального порошка [6, с. 237-239].

Бессонова В.Ю. и Башкарев А.Я. предлагают использование регрессионного анализа для установления корреляционных связей между параметрами компонентов и свойствами асфальтобетона [6, с. 238]. Однако линейные модели не учитывают сложный характер взаимодействия компонентов при различных температурно-временных режимах перемешивания.

Более перспективным представляется применение нелинейных математических моделей, учитывающих многофакторность

технологического процесса. Суворов Д.Н. и его коллеги разработали модель прогнозирования с учетом возмущений, возникающих при изменении свойств исходных материалов [7, с. 763-768].

Предлагаемая математическая модель основывается на следующих принципах:

Функция качества асфальтобетонной смеси представляется в виде:

$$Q = f(x_1, x_2, \dots, x_n, T, t, V) \quad (1)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ - параметры свойств компонентов, T - температура смешения, t - время перемешивания, V - скорость перемешивания.

Для учета нелинейности процесса используется полиномиальная модель второго порядка:

$$Q = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

где a_0, a_i, a_{ij} - коэффициенты модели, ε - случайная ошибка, x_i - влияющие факторы, от которых зависит качество, прочность, плотность и т.д.

Результаты валидации математической модели показывают высокую степень корреляции между расчетными и экспериментальными значениями показателей качества асфальтобетонной смеси. Коэффициент детерминации составляет 0,92-0,95 для различных типов смесей, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Разработанный алгоритм представляет собой многоуровневую систему принятия решений, включающую блоки сбора данных, анализа информации, прогнозирования качества и формирования управляющих воздействий. Волков И.Н. и Волков Н.М. подчеркивают важность интеграции различных подсистем для обеспечения эффективного управления процессом изготовления асфальтобетонных смесей [7, с. 52-54].

Таблица №2.

Входные параметры математической модели и их диапазоны значений [7, с. 64-66; 4, с. 3-5].

№	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Диапазон значений	Влияние на качество
1	Прочность щебня	X_1	МПа	80-120	Высокое
2	пустотный щебня	X_2	%	40-50	Среднее
3	Гранулометрия щебня	X_3	мм	5-20	Высокое
4	Модуль крупности песка	X_4	-	1,5-2,5	Среднее
5	Пенетрация битума	X_5	0,1 мм	60-90	Высокое
6	Температура размягчения битума	X_6	°С	45-55	Высокое
7	Удельная поверхность минпорошка	X_7	м ² /кг	300-500	Среднее

Алгоритм функционирует в следующей последовательности:

Первый этап предусматривает непрерывный мониторинг свойств поступающих компонентов с использованием автоматизированных измерительных систем. Прокопьев А.П. и Большаков А.А. отмечают важность применения современных средств неразрушающего контроля для оперативного получения информации о характеристиках материалов [8, с. 100-105].

Второй этап включает обработку полученных данных с применением разработанной математической модели для прогнозирования свойств готовой смеси при текущих технологических параметрах. Система анализирует отклонения прогнозируемых характеристик от нормативных требований и

формирует сигналы о необходимости корректировки параметров производства.

Таблица №3.

Структура алгоритма автоматизированного контроля

№	Блок алгоритма	Входные данные	Методы обработки	Выходные данные	Время выполнения, с
1	Сбор данных	Сигналы датчиков	Фильтрация, нормализация	Массив параметров	1-2
2	Анализ данных	Параметры компонентов	Статистический анализ	Оценка качества	3-5
3	Прогнозирование	Текущие параметры	Математическая модель	Прогноз свойств	2-3
4	Оптимизация	Прогноз, ограничения	Алгоритм оптимизации	Управляющие воздействия	5-8
5	Контроль результата	Фактические свойства	Сравнительный анализ	Коррекция модели	1-2

Третий этап предусматривает определение оптимальных управляющих воздействий с использованием методов многокритериальной оптимизации. Целевая функция включает минимизацию отклонений от требуемых характеристик при ограничениях по расходу материалов и энергетическим затратам.

Четвертый этап обеспечивает реализацию сформированных управляющих воздействий через систему автоматического регулирования дозирочного оборудования, температурных режимов и времени перемешивания. Никитаев М.М. с соавторами подчеркивают необходимость точного исполнения команд управления для достижения требуемого качества продукции [9, с. 1933-1935].

Пятый этап включает контроль результативности принятых мер через анализ фактических свойств произведенной смеси и корректировку параметров математической модели при выявлении систематических отклонений.

Апробация разработанного алгоритма проводилась на экспериментальной установке, моделирующей технологический процесс производства асфальтобетонных смесей. Исследования включали сравнение результатов работы традиционной системы контроля и предлагаемого алгоритма автоматизированного управления.

Братчун В.И. с соавторами отмечают важность учета параметров технологических режимов при оценке качества асфальтобетонных смесей [10, с. 6-8]. Экспериментальные исследования проводились для различных составов смесей при вариации свойств исходных компонентов в пределах, характерных для реальных условий производства.

Результаты экспериментов показывают существенное улучшение стабильности показателей качества при использовании разработанного алгоритма. Стандартное отклонение показателя прочности при сжатии снизилось с 2,8 МПа до 1,6 МПа, водостойкости - с 0,08 до 0,04.

Анализ данных таблицы №4 подтверждает эффективность предлагаемого алгоритма автоматизированного контроля. Наиболее значительное улучшение достигнуто по показателю морозостойкости, что объясняется более точным контролем пористости смеси за счет оптимизации соотношения компонентов.

Экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма складывается из снижения расхода материалов, сокращения количества брака и повышения производительности оборудования. Расчеты показывают возможность получения экономического эффекта в размере 180-220 рублей на тонну произведенной смеси.

Таблица №4.

Результаты сравнительных испытаний систем контроля качества

№	Показатель	Традиционная система	Автоматизированная система	Улучшение, %
1	Прочность при сжатии, МПа	$12,5 \pm 2,8$	$13,8 \pm 1,6$	+10,4
2	Водостойкость	$0,85 \pm 0,08$	$0,92 \pm 0,04$	+8,2
3	Морозостойкость, циклы	48 ± 8	55 ± 5	+14,6
4	Расход битума, % от массы	$5,8 \pm 0,3$	$5,4 \pm 0,2$	-6,9
5	Время производства партии, мин	25 ± 5	22 ± 3	-12,0

Успешное внедрение разработанного алгоритма автоматизированного контроля требует комплексного подхода к модернизации производственной системы. Асельдеров Б.Ш. подчеркивает важность оптимизации температурного режима для обеспечения стабильного качества асфальтобетонных смесей [11, с. 109-111].

Техническое обеспечение внедрения включает установку дополнительных датчиков контроля свойств материалов, модернизацию системы автоматического дозирования и создание программно-аппаратного комплекса для реализации алгоритма управления. Мочалов И.В. разработал специализированное программное обеспечение для анализа свойств асфальтобетона с применением искусственного интеллекта [12].

Организационные мероприятия предусматривают обучение персонала работе с новой системой, разработку регламентов технологического процесса и создание системы контроля качества настройки алгоритма. Чурсин Е.В.

отмечает необходимость систематизации факторов технологии изготовления асфальтобетона для эффективного управления процессом [13, с. 114-116].

Таблица №5.

Этапы внедрения автоматизированной системы контроля

№	Этап	Продолжительность, мес	Основные мероприятия	Ожидаемые затраты, тыс. руб
1	Проектирование	2-3	Разработка технического задания, выбор оборудования	150-200
2	Монтаж оборудования	1-2	Установка датчиков, модернизация системы управления	800-1200
3	Программирование	2-4	Разработка и настройка программного обеспечения	300-500
4	Пусконаладочные работы	1-2	Калибровка системы, обучение персонала	100-150
5	Опытная эксплуатация	3-6	Отладка алгоритма, анализ результатов	50-100

Особое внимание при внедрении следует уделять калибровке измерительных систем и адаптации математической модели к условиям конкретного производства. Штыкова И. с соавторами подчеркивают важность точной настройки алгоритма дозирования для обеспечения стабильности состава смеси [14, с. 360-365].

Мониторинг эффективности внедренной системы должен включать регулярный анализ показателей качества продукции, контроль расхода

материалов и оценку производительности оборудования. Данные мониторинга используются для дальнейшего совершенствования алгоритма и повышения его эффективности.

Развитие технологий искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые возможности для совершенствования систем автоматизированного контроля производства асфальтобетонных смесей. Прокопьев А.П. в своих исследованиях демонстрирует потенциал применения нейронечетких систем для прогнозирования свойств материалов [15, с. 36-40].

Интеграция технологий интернета вещей позволяет создавать распределенные системы мониторинга, охватывающие весь технологический цикл от подготовки сырья до контроля качества готовой продукции. Подобные системы обеспечивают непрерывность контроля и возможность оперативного реагирования на изменения условий производства.

Перспективным направлением развития является создание адаптивных систем управления, способных самостоятельно корректировать параметры математических моделей на основе накопленного опыта эксплуатации. Братчун В.И. с соавторами отмечают важность учета изменчивости свойств материалов для обеспечения стабильного качества продукции [16, с. 95-100]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов прогнозирования долгосрочных характеристик асфальтобетонных покрытий на основе данных о свойствах исходных материалов и параметрах технологического процесса производства смесей.

Разработанный алгоритм автоматизированного контроля и корректировки технологических параметров производства асфальтобетонных смесей представляет собой комплексное решение, обеспечивающее повышение качества продукции и эффективности производственного процесса.

Основными научными результатами исследования являются математическая модель прогнозирования свойств асфальтобетонных смесей на основе характеристик компонентов, алгоритм многокритериальной оптимизации технологических параметров и методика оценки эффективности автоматизированных систем контроля.

Экспериментальные исследования подтверждают возможность повышения стабильности показателей качества на 15-20% и снижения расхода материалов на 8-12% при внедрении предложенного алгоритма. Экономический эффект составляет 180-220 рублей на тонну произведенной смеси.

Практическая значимость работы заключается в создании научно-методической основы для проектирования и внедрения автоматизированных систем управления качеством производства асфальтобетонных смесей. Результаты исследования могут быть использованы при модернизации существующих асфальтобетонных заводов и проектировании новых производственных комплексов.

Направлениями дальнейших исследований являются разработка методов интеллектуального анализа больших данных для прогнозирования эксплуатационных характеристик дорожных покрытий и создание адаптивных систем управления технологическими процессами производства строительных материалов.

Литература

1. Волков И. Н., Бурковский В. Л. Алгоритмизация управления технологическими процессами производства асфальтобетонных смесей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. – № 5. – С. 16-22.
2. Волков И. Н., Бурковский В. Л., Шелякин В. П. Интеллектуализация принятия решений в системе управления

технологическим процессом производства асфальтобетонной смеси // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20. – № 1. – С. 39-44.

3. Исмаилов А. М. Методы управления качеством технологических процессов приготовления и транспортировки асфальтобетонных смесей на основе теории рисков: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2023. [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; Диссовет У.2.1.8.04]. — Санкт-Петербург, 2023. — 241 с.

4. Мещеряков С. Ю., Мещерякова А. А. Разработка автоматизированной системы управления производством асфальтобетонной смеси // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах: материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Воронеж, 2025. – С. 203-209.

5. Волков И. Н., Бурковский В. Л. Алгоритмизация управления технологическими процессами производства асфальтобетонных смесей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. – № 5. – С. 16-22.

6. Бессонова В. Ю., Башкарев А. Я. Математическая модель для автоматизации технологического процесса приготовления асфальтового бетона // Цифровые инфокоммуникационные технологии: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, посвященная 40-летию факультета "Информационные технологии управления" и 50-летию кафедры "Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте". – Ростов-на-Дону, 2022. – С. 237-240.

7. Волков И. Н., Волков Н. М. Автоматизация изготовления асфальтобетонных смесей // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2024. – № 1. – С. 52-55.
 8. Суворов Д. Н., Нгуен С., Зыонг Д. Автоматизация контроля гранулометрического состава и расхода битума при производстве асфальтобетонной смеси // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 8. – С. 64-70.
 9. Никитаев М. М., Малазони Г. Ш., Никонова О. Н., Васильев Ю. Э. Управление процессом производства асфальтобетонных смесей // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов. – Москва, 2024. – С. 1933-1937.
 10. Братчун В. И., Конев О. Б., Жеванов В. В., Размыслова Е. Д., Шекунова Е. А., Коршун Д. В. О параметрах технологических режимов производства, укладки и уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – № 1 (165). – С. 3-9.
 11. Асельдеров Б. Ш. Оптимизация температурного режима и процесса приготовления асфальтобетонной смеси // Актуальные проблемы строительства, природообустройства, кадастра и землепользования: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Махачкала, 2022. – С. 109-112.
 12. Мочалов И. В. Асфальтоанализатор ИИ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025611656, 22.01.2025. Заявка № 2024693335 от 25.12.2024.
 13. Прокопьев А. П. Синтез и реализация систем управления уплотнением асфальтобетонных смесей на базе техники размещения полюсов систем и вычислительных технологий // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 1. – С. 115-122.
-

14. Штыкова И., Кузьмина Н., Шинкевич Т. Разработка алгоритма эффективного управления процессом автоматического дозирования компонентов бетонной смеси с целью уменьшения неблагоприятного влияния на окружающую среду // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2024. – № 5 (134). – С. 360-370.

15. Прокопьев А. П., Большаков А. А. Разработка модели системы контроля с нейронечетким прогнозированием плотности асфальтобетонной смеси для укладчиков // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 9. – С. 36-43.

16. Братчун В. И., Беспалов В. Л., Пшеничных О. А., Демешкин В. П., Леонов Н. С. Технологичные горячие и литые дорожные асфальтобетонные смеси // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 95-108.

References

1. Volkov I. N., Burkovskij V. L. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. T. 19. № 5. pp. 16-22.

2. Volkov I. N., Burkovskij V. L., Shelyakin V. P. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2024. T. 20. № 1. pp. 39-44.

3. Ismailov A. Metody` upravleniya kachestvom tekhnologicheskix processov prigotovleniya i transportirovki asfal`tobetonnny`x smesey na osnove teorii riskov: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskix nauk [Methods for Quality Management of Technological Processes in the Preparation and Transportation of Asphalt Concrete Mixtures Based on Risk Theory: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences]. M. Sankt-peterburgskij politexnicheskij universitet Petra Velikogo. 2023. [Mesto zashhity: FGAOU VO «Sankt-Peterburgskij politexnicheskij universitet Petra Velikogo»; Dissovet U.2.1.8.04]. Sankt-Peterburg, 2023. 241 p.

4. Meshheryakov S. Yu., Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii преподавателей i specialistov i Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov i molody`x ucheny`x. Voronezh, 2025. pp. 203-209.
5. Volkov I. N., Burkovskij V. L. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2023. T. 19. № 5. pp. 16-22.
6. Bessonova V. Yu., Bashkarev A. Ya. Cifrovye infokommunikacionnye tehnologii: sbornik nauchny`x trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashhennaya 40-letiyu fakul'teta Informacionnye tehnologii upravleniya i 50-letiyu kafedry` Avtomatika i telemexanika na zheleznodorozhnom transporte. Rostov-na-Donu, 2022. pp. 237-240.
7. Volkov I. N., Volkov N. M. Vy`sokie tehnologii v stroitel`nom komplekse. 2024. № 1. pp. 52-55.
8. Suvorov D. N., Nguen S., Zy`ong D. Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2023. № 8. pp. 64-70.
9. Nikitaev M. M., Malazoni G. Sh., Nikonova O. N., Vasil`ev Yu. E`. XIV Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravleniya: sbornik nauchny`x trudov. Moskva, 2024. pp. 1933-1937.
10. Bratchun V. I., Konev O. B., Zhevanov V. V. Vestnik Donbasskoj nacional`noj akademii stroitel`stva i arxitektury`. 2024. № 1 (165). pp. 3-9.
11. Asel`derov B. Sh. Aktual`nye problemy` stroitel`stva, prirodoobustrojstva, kadastra i zemlepol`zovaniya: sbornik nauchny`x trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Maxachkala, 2022. pp. 109-112.
12. Mochalov I. V. Asfal`toanalizator II: svidetel`stvo o registracii programmy` dlya E`VM RU [Asphalt analyzer AI: certificate of registration of the computer program RU]. 2025611656, 22.01.2025. Zayavka № 2024693335 ot 25.12.2024.



13. Prokop`ev A. P. Matematicheskie metody` v texnologiyax i texnike. 2024. № 1. pp. 115-122.

14. Shty`kova I., Kuz`mina N., Shinkevich T. Vestnik Kazaxskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Ty`ny`shpaeva. 2024. № 5 (134). pp. 360-370.

15. Prokop`ev A. P., Bol`shakov A. A. Sovremenny`e naukoemkie texnologii. 2024. № 9. pp. 36-43.

16. Bratchun V. I., Bepalov V. L., Pshenichny`x O. A., Demeshkin V. P., Leonov N. S. Sovremennoe promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo. 2022. T. 18. № 3. pp. 95-108.

Дата поступления: 17.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025