

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 004.896:69.002.5

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
УПЛОТНЕНИЕМ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Прокопьев А.П.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: prok1@yandex.ru

Эффективное управление дорожными машинами в процессе уплотнения асфальтобетонных смесей имеет решающее значение для обеспечения нормативных сроков службы дорожных покрытий автомобильных дорог. Традиционно уплотнение смесей осуществляется отрядом дорожных машин – асфальтоукладчиков и катки легкого, среднего и тяжелого типов. Технологические процессы укладки и уплотнения слоев асфальтобетонных дорожных покрытий в Российской Федерации могут быть усовершенствованы за счет автоматизации и оптимизации организации процессов уплотнения асфальтобетонных смесей укладчиками и дорожными катками на базе достижений в области цифровизации и искусственного интеллекта. Рассмотрены теоретические основы нового класса организационно-технических систем – интеллектуальных систем управления уплотнением, принципы функционирования которых предусматривают обеспечение заданного качества уплотнения асфальтобетонных смесей в процессе строительства автомобильных дорог. Разработка систем этого класса обусловлена в первую очередь переходом к цифровым, интеллектуальным и неразрушающим технологиям в дорожном строительстве. Представлены результаты анализа технологического процесса строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, теоретических положений взаимодействия асфальтоукладчиков и катков с дорожными материалами при уплотнении. Определены факторы процесса уплотнения, оказывающие основное влияние на качество дорожных покрытий. Обосновано использование методов искусственного интеллекта для разработки интеллектуальных систем управления уплотнением асфальтобетонных смесей.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, уплотнение, асфальтоукладчик, дорожный каток, система контроля, интеллектуальная система управления

**THEORETICAL FOUNDATIONS OF BUILDING INTELLIGENT
CONTROL SYSTEMS FOR COMPACTION ASPHALT MIXTURES**

Prokopev A.P.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: prok1@yandex.ru

Effective management of road machines in the process of compaction asphalt mixtures is crucial to ensure the standard service life of asphalt pavements. Traditionally, the compaction of asphalt mixtures is carried out by a detachment of road vehicles – an paver and rollers of light, medium and heavy types. Technological processes of laying and compacting layers of asphalt road surfaces in the Russian Federation can be improved by automating and optimizing the organization of the processes of compacting asphalt mixtures by pavers and road rollers based on advances in digitalization and artificial intelligence. The theoretical foundations of a new class of organizational and technical systems – intelligent compaction control systems, the principles of functioning which provide for ensuring a given quality of compaction asphalt concrete mixtures in the process of road construction are considered. The development of systems of this class is due, first of all, to the transition to digital, intelligent and non-destructive technologies in road construction. An analysis of the technological process of construction the upper layers of asphalt pavements roads, theoretical provisions of the interaction pavers and rollers with road materials during compaction is carried out. The factors of the compaction process, which have the main impact on the quality of road surfaces, have been determined. The use of artificial intelligence methods for the development of intelligent control systems for the compaction of asphalt mixtures has been substantiated.

Keywords: asphalt mixture, compaction, paver, road roller, control system, intelligent control system

Повышение качества и увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог является народнохозяйственной проблемой, для решения которой требуется привлечение передовых достижений в области цифровизации, глобальных навигационных спутниковых систем, мобильной связи, технических средств автоматизации, и других средств и инструментов, являющихся элементами развития концепции «Индустрия 4.0» и концепции следующей эпохи промышленной революции.

Программой цифровизации в сфере дорожного хозяйства в Российской Федерации (Распоряжение Министерства транспорта

Российской Федерации от 31 мая 2021 г. № ВС-105-р) предусмотрены мероприятия, направленные на формирование и ведение информационных моделей объектов капитального строительства для всех автомобильных дорог. Высокий уровень развития сетей Интернет, мобильной связи, глобальных навигационных спутниковых систем, способствуют процессам цифровизации дорожной отрасли. В дорожной отрасли имеется значительное отставание в области цифровизации по сравнению с отраслями машиностроения и др.

За счет качественного уплотнения слоев асфальтобетонных (АБ) материалов уклад-

чиками и дорожными катками статического и вибрационного типов можно устраниć до 50% недостатков дорожных покрытий в период эксплуатации и увеличить срок их службы [1, 2]. Основные достоинства асфальтобетонных покрытий: большой срок службы; применение в разных климатических регионах; возможность применения для высоконагруженных автомобильных дорог; хорошие показатели ровности поверхности, комфорта для автотранспорта; рациональные затраты на строительство, эксплуатацию и ремонт; удобство обслуживания во время эксплуатации; вторичное использование материала.

Традиционно уплотнение АБ смесей выполняет отряд дорожных машин – асфальтоукладчик и дорожные катки разного типа. Асфальтоукладчик обеспечивает технологические операции: приемку асфальтобетонной смеси; транспортирование к месту укладки; распределение АБ смеси по ширине покрытия; нивелирование поверхности; предварительное уплотнение АБ смеси. Машинисты асфальтоукладчиков во время работы испытывают большую физическую и умственную нагрузку, что может приводить к ошибкам принятия решений в управлении. Все процессы, кроме уплотнения, в асфальтоукладчиках автоматизированы. Уплотняющую способность современных асфальтоукладчиков можно оценивать как высокую. Это доказано при проведении полевых и лабораторных экспериментальных исследований зарубежными и отечественными учеными, когда были получены значения коэффициента уплотнения, соответствующие нормативным [3–5].

Согласно действующему ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства» степень уплотнения асфальтобетона характеризуется коэффициентом уплотнения K_y . В конструктивных слоях дорожной одежды его оценивают по формуле [6]

$$K_y = \rho_m^a / \rho^a, \quad (1)$$

где ρ_m^a и ρ^a – соответственно средняя и действительная плотность образцов асфальтобетона из конструктивного слоя по ГОСТ 12801-98, г/см³.

Структура асфальтобетона – совокупность признаков, определяющих его пространственное расположение компонентов и характер связи между ними, оценивается величиной плотности и пористости дорожного материала. В работе [6] доказано аксиоматическое утверждение, что если остаточная пористость асфальтобетона соответствует требованиям норм, то и степень его уплотнения соответствует требованиям

норм, и наоборот. Оно вытекает непосредственно из формулы (1):

$$K_y = \rho_m^a / \rho^a = 1 - 0,01 \cdot V_{\text{пор}}^a, \quad (2)$$

где $V_{\text{пор}}^a$ – остаточная пористость асфальтобетона, %.

Из формулы (2) следует, что оценку качества уплотнения при использовании различных неразрушающих технологий можно выполнять, определяя величину пористости $V_{\text{пор}}^a$ или коэффициента уплотнения K_y .

Важно отметить, что процесс уплотнения АБ смеси укладчиком происходит при температуре 140–130 °C, когда сопротивление смеси меньше, чем при уплотнении дорожными катками легкого, среднего и тяжелого типов (при 120–90 °C). В случае реализации укладчиком 100% плотности комплект ДСМ может уменьшиться до одного типа тяжелого вибрационного или статического катка, что обеспечивает экономический эффект из-за снижения расходов на аренду катков (меньше количество и типо-размеров катков), а также сокращения количества проходов. Хотя бы один статический тяжелый каток рекомендуется использовать для завершения формирования структурной прочности асфальтобетона, которое сопровождается дополнительным смещением частиц относительно друг друга в условиях усиливающейся kleящей способности дорожного битума, а также для получения более высокого качества ($K_y = 1,00–1,10$), что правильно для увеличения срока службы покрытия [5]. С увеличением коэффициента уплотнения асфальтобетонных смесей увеличиваются её физико-механические свойства [7, 8] (табл. 1).

При строительстве верхних слоев АБ покрытий за рубежом используются повышенные скорости укладки смеси. В США скорость укладки до 20 м/мин, с обязательным обеспечением устранения температурной и фракционной сегрегации смеси, автоматическим управлением нивелирования и контролем температуры по ширине поверхности. В европейских странах скорость укладки смесей до 6–7 м/мин, в Российской Федерации – 2–3 м/мин. Поэтому в США и Европе большое внимание в технологическом процессе уплотнения уделяется работе дорожных катков.

Асфальтоукладчики обеспечивают укладку смеси и предварительное уплотнение. Для автоматизации дорожных катков ведущими зарубежными компаниями разработаны системы, реализующие неразрушающие технологии «интеллектуального уплотнения» (IC, Intelligent Compaction) и «непрерывного контроля уплотнения» (CCC, Continuous Compaction Control).

Таблица 1

Значения коэффициента уплотнения АБ смеси и соответствующие ему физико-механические свойства асфальтобетонных покрытий

Коэффициент уплотнения АБ смеси	0,97	0,98	0,99	1,0	1,01
Прочность АБ покрытий, %	75	88	100	110	122
Долговечность АБ покрытий, %	70	85	100	112	125

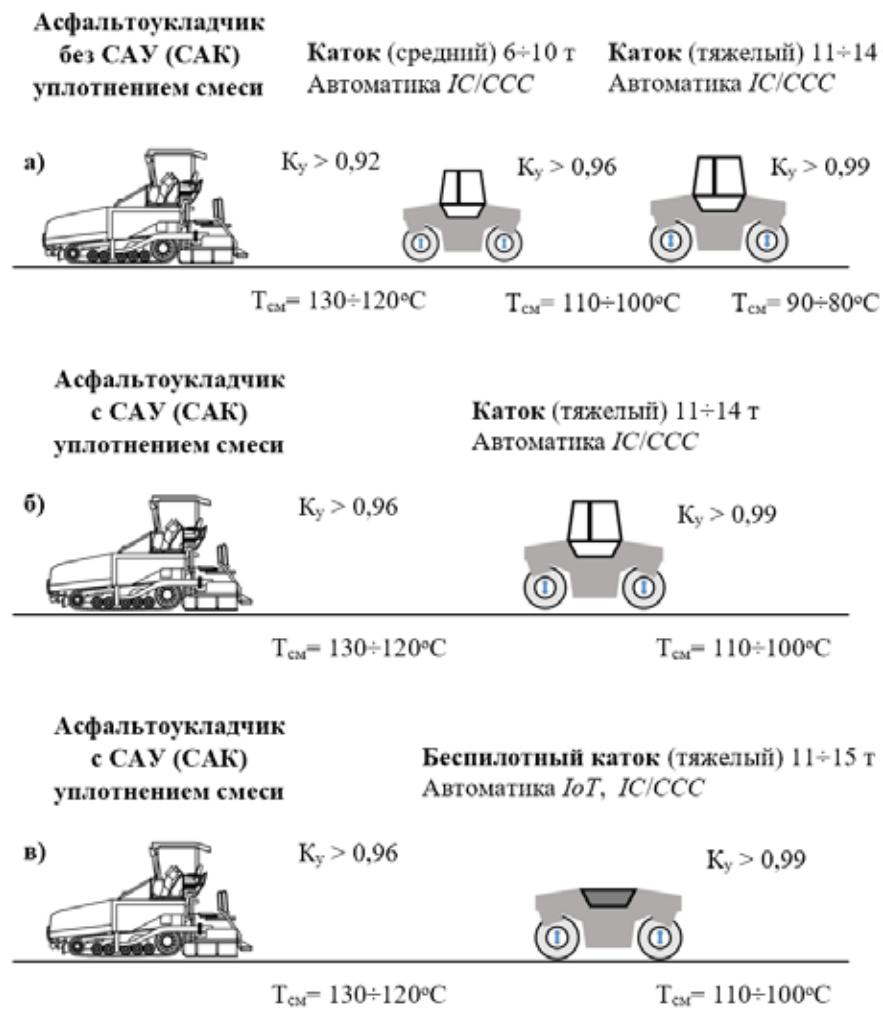


Рис. 1. Варианты отрядов машин для уплотнения асфальтобетонных смесей:

а) традиционная технология уплотнения;
б) технология с автоматизацией процесса уплотнения смеси асфальтоукладчиком;
в) перспективный вариант технологии уплотнения

Физический смысл технологии IC/CCC заключается в наличии функциональной зависимости степени уплотнения дорожного материала от его жесткости. Изменение жесткости материала оценивается по амплитудам и частотам гармонических колебаний вибрационного вальца. Автоматизированные системы контроля уплотнения для асфальтоукладчиков не разработаны.

Целью работы является разработка теоретических основ построения интеллектуальной системы управления уплотнением асфальтобетонных смесей.

Объектом исследования являются системы управления уплотнением асфальтобетонных смесей.

Предметом исследования являются экспериментальные и математические модели

показателей качества уплотнения асфальтобетонных смесей, методы искусственного интеллекта, системного анализа, а также способы повышения эффективности технологических процессов уплотнения.

В состав системы управления уплотнением АБ смесей входят взаимодействующие между собой: асфальтоукладчик – асфальтобетонная смесь; дорожные катки с гладкими вальцами – асфальтобетонная смесь; асфальтоукладчик – дорожные катки.

Рассматривается приводной и тактический уровни иерархии интеллектуальных систем управления [9], в разных вариантах автоматизированных отрядов дорожных машин (рис. 1).

На схеме (рис. 1, а) показан современный вариант технологического процесса уплотнения, при этом используются автоматизированные вибрационные катки, оснащенные приборами непрерывного контроля уплотнения (системы IC/CCC). В предлагаемом варианте технологии уплотнения (рис. 1, б) предусматривается использование принципа максимальной уплотняющей эффективности асфальтоукладчиков, оснащенных САУ (САК) уплотнения и применение автоматизированных вибрационных (вибрационно-осциллирующих) катков тяжелого типа (11–14 т). Перспективный усовершенствованный вариант технологии (рис. 1, в) предполагает использование беспилотных (автономных) катков тяжелого типа. Такой вариант соответствует современным тенденциям цифровизации технологических процессов, внедрения киберфизических систем, использования Интернета вещей. Опытно-конструкторские работы по созданию автономных (беспилотных) дорожных катков, разработке автоматических систем контроля и мониторинга качества уплотнения на базе интернета вещей проводят ведущие мировые производители [10–12].

Взаимодействие между АУ и катками информационное, посредством сетей беспроводной связи. Асфальтоукладчики и катки создают силовое трамбующее (трамбующий брус), вибрационное (вибрационная плита, вибрационный валец катка) и статическое (валец катка) уплотняющее воздействие на асфальтобетонную смесь. Заключительное уплотнение АБ смеси тяжелыми катками – 2–4 прохода по одному следу, с использованием вибрационного или статического режимов, в зависимости от степени уплотнения смеси после укладчика.

Для разработки теоретических основ интеллектуальной системы управления уплотнением требуется провести анализ объекта управления, а также получить ее информационное описание.

Теоретические основы процесса управления уплотнением асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками и дорожными катками

В соответствии с СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги»: асфальтобетонная смесь: Рационально подобранные смеси минеральных материалов с органическим вяжущим, взятых в определенных соотношениях и перемешанных в нагретом состоянии. Асфальтобетонные смеси получают в асфальтосмесительных установках непрерывного или циклического действия в результате перемешивания в смесителе нагретых до температуры 160–180 °С и загруженных в определенных пропорциях инертных материалов (щебня, песка), минерального порошка, битума и поверхностно-активных добавок [13].

В результате уплотнения АБ смесей рабочими органами асфальтоукладчиков и дорожных катков формируется макро-, мезо- и микроструктура асфальтобетона. Эти структуры, в зависимости от содержания зерен щебня (макро), песчаных зерен (мезо), частиц минерального порошка (микро) в составе смеси, создают подструктуры базальную, переходного типа и контактную [14]. Типовой способ уплотнения представляется как давление на слой смеси штампом, за счет которого происходит уменьшение расстояний между частицами разного размера. Сопротивление перемещению частиц создаются в начальный период пленки объемного битума, а далее структурированного битума. Большие частицы должны перемещаться в менее плотное пространство мелкие частицы, перемещать или обходить близкие по размеру частицы, а также преодолевать зацепление частиц друг за друга. В процессе сближения частиц и увеличения плотности асфальтобетонного слоя его сопротивление дальнейшему уменьшению толщины растет, для преодоления его давление должно усиливаться. Эти взаимодействия имеют место до момента получения слоя заданной плотности, определяемой по значениям средней плотности и остаточной пористости. В реальных условиях строительства это управляется коэффициентом уплотнения, представляющим собой отношение достигнутой плотности, к стандартной плотности, определенной на стадии подбора смеси [15].

Исследование физико-механических и теплофизических свойств асфальтобетонных смесей, методов теоретического описания напряженно-деформированного состояния асфальтобетонных смесей, асфальтобетона посвящены работы отечественных и зарубежных ученых, среди которых можно выделить два подхода: термодинамический –

А.М. Завьялов, М.А. Завьялов, Е. Masad, H.L. Huerne, K.R. Rajagopal, S. Koneru, A. Scarpas, C. Kasbergen, K. Emad, Z. Hossain и др., – и реологический – Н.Я. Хархута, А.М. Богуславский, В.И. Баловнев, В.Б. Пермяков, Я.А. Калужский, С.И. Иванченко, R.N.J. Saal, R.R. Stander, J.W.A. Labout, A.A. Zaman, C.L. Beatty, R. Anderegg, A.L. Fricke, A. Zbiciak, K. Kaufmann, F. Beainy, A. Felten Dominik, S. Commuri, M.A. Zaman, S.A. Imran и др.

Асфальтобетонная смесь – сложный композиционный материал, который в процессе уплотнения проявляет упругие, вязкие и пластические свойства. Для теоретического описания поведения ее в напряженно-деформированном состоянии при механическом воздействии используются реологические модели. Они представляют собой упрощенные механические модели: упругое тело – пружина; вязкая жидкость – демпфер; идеальное пластичное тело – пара трения. Сложные реологические модели дорожных материалов получают из элементов, каждый из которых (или их сочетание) дает представление о базовых свойствах материала и характере напряженно-деформированного состояния под действием внешних уплотняющих нагрузок. Параметры реологических моделей асфальтобетонных смесей зависят от типа смеси, температуры, содержания и вязкости битума. Они практически не зависят от скорости нагружения слоев АБ смесей в диапазоне 0,02–0,10 м/с.

Реологические свойства асфальтобетонной смеси характеризуются ползучестью и проявлением релаксации напряжений. Механические характеристики уплотняемого материала – упругость, вязкость и пластичность – описываются фундаментальными реологическими моделями. К фундаментальным относятся реологические модели Гука (идеально упругое тело), Ньютона (идеально вязкое тело) и Сен-Венана (идеально пластичное тело). Для описания более сложных свойств асфальтобетонных смесей используются многоэлементные системы, такие как модель Кельвина – Фойгта, Бюргерса, Богуславского, Бинггама, Шведова, лестничного типа и др. [16, 17]. Обоснование и выбор реологической модели зависит от конкретной решаемой задачи и принятых допущений. Многие исследователи для моделирования процесса взаимодействия уплотняющих органов машин с асфальтобетонными смесями используют реологическую модель тела Кельвина – Фойгта [18, 19].

Один из подходов к исследованию реологических свойств деформируемых дорожных материалов с применением теории наследственной ползучести упруго-вязко-

пластичных материалов предложен в работе [20] и получил развитие в статье [21]. Для повышения эффективности исследований с использованием реологических моделей в работах В.А. Богомолова, В.К. Жданюк, С.В. Богомолова [22–24], А.М. Богуславского [25] и других ученых рассмотрены методы автоматизированного создания моделей дорожных материалов. Теоретические основы построения реологических моделей для моделирования рабочих процессов транспортно-технологических и дорожно-строительных машин рассмотрены в работах В.И. Баловнева [26, 27].

Исследованием рабочих процессов и разработкой конструкций асфальтоукладчиков и дорожных катков занимались и занимаются ученые и коллектизы научно-исследовательских институтов и вузов: ВНИИ-Истройдормаш, СоюздорНИИ, МАДИ, ХАДИ, СПбГПУ, СибАДИ, ЯГТУ, ВолгГАСУ, ВГАСУ, ТОГУ, СФУ и др. Экспериментальным исследованиям технологических процессов и вопросам теории уплотнения дорожных материалов посвящены научные работы зарубежных ученых L.W. Nijboer, P. Böhmer, H. Thurner, Å. Sandström, L. Forssblad, D. Adam, R. Anderegg, D.J. White, M. Mooney, K. Kaufmann, P. Vennapusa, S. Commuri, M. Zaman, J. Pistrol, S.A. Imran, и отечественных ученых В.Ф. Бабкова, В.И. Баловнева, О.Т. Батракова, А.К. Бирюля, Я.А. Калужского, А.М. Холодова, А.А. Наседкина, Н.Я. Хархуты, Н.А. Ульянова, В.Б. Пермякова, С.Н. Иванченко, Д.Г. Суворова, А.А. Шестопалова, А.В. Захаренко, Н.Н. Иванова, А.Ю. Прусов, Ю.Я. Андрейченко, Ю.М. Васильева, В.В. Бадалова, С.А. Варганова, Н.П. Вошинина, А.А. Иноземцева, Б.С. Марышева, М.П. Костельрова, Ф.К. Ломанова, Е.М. Куприянова, В.А. Смоленцева, С.Б. Партинова, М. Беккера, М.А. Завьялова, А.Ф. Зубкова, Г.В. Кустарева, С.В. Носова, Е.К. Чабуткина, Ю.С. Сачук, С.В. Савельева, В.В. Дубкова, А.В. Шапошникова, К.В. Беляева, С.А. Милищенко, И.С. Тюремнова, Н.А. Кондрашова, А.С. Морева, А.В. Бойцева, Е.А. Шишнина и др.

Современные рабочие органы асфальтоукладчиков состоят из выглаживающей плиты (статической или вибрационной), трамбующего бруса с кинематическим приводом, прессующих планок с гидроприводом. В разном сочетании этих элементов существуют варианты компоновки рабочих органов АУ, рис. 2: 1) трамбующий брус + вибрационная плита; 2) трамбующий брус + выглаживающая плита; 3) трамбующий брус + выглаживающая плита + планка; 4) трамбующий брус + вибрационная плита + две планки [28].

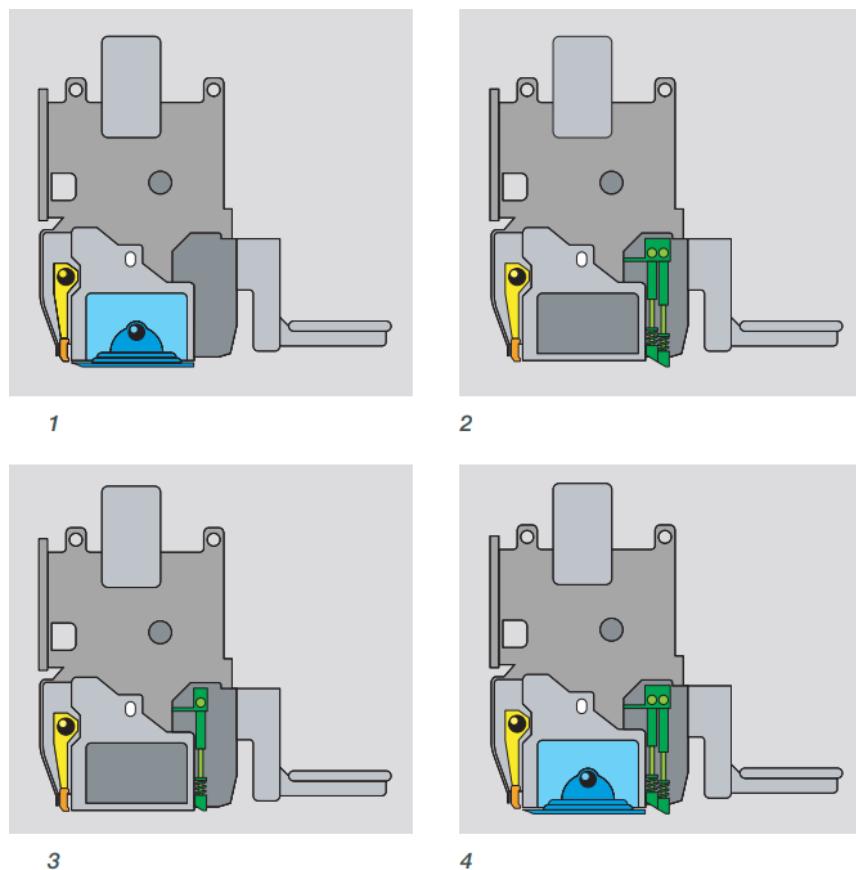


Рис. 2. Типовые компоновки рабочих органов АУ

Процесс уплотнения смеси асфальтоукладчиком представляет собой деформирование АБ смеси трамбующим бруском, имеющим кинематический привод, вибрационной плитой, прессующими планками. Цикл уплотнения смеси асфальтоукладчиком представляет собой несколько ударов трамбующим бруском (например, при скорости АУ 3,2 м/с и частоте трамбования 1300 мин⁻¹ – 5 ударов бруском), после чего достигается максимальная степень уплотнения смеси при установленных режимах.

С учетом постоянной скорости АУ, цикл уплотнения АБ смеси характеризуется как одинаковый промежуток времени, за который должно происходить не менее 4–6 ударов, в зависимости от частоты эксцентрикового вала. Асфальтоукладчик с рабочим органом «трамбующий брус – вибрационная плита» основное уплотнение обеспечивает трамбующим бруском (4–6 ударов), а плита только улучшает качество АБ поверхности и позволяет увеличить скорость укладки. Динамические переменные процесса уплотнения АБ смесей – частота вибрации, амплитуда, скорость и ускорение элементов конструкции и материала, за-

висят от физико-механических характеристик уплотняемого материала и изменяются в процессе его уплотнения. Амплитуду колебаний уплотняющего в зависимости от изменений плотности материала следует корректировать [29].

Эффективное уплотнение дорожно-строительных материалов, по исследованиям профессора Н.Я. Хархуты, характеризуется накоплением материалом остаточных деформаций и обеспечивается при соблюдении условия, при котором контактные давления, возникающие под уплотняющим рабочим органом (валцом, колесом, плитой), не должны превышать предела прочности материала, т.е.

$$\sigma_{\text{тек}} < \sigma_{\text{конт}} \leq [\sigma_{\text{пред}}],$$

где $\sigma_{\text{тек}}$ – предел текучести уплотняемого материала; $\sigma_{\text{пред}}$ – предел прочности уплотняемого материала; $\sigma_{\text{конт}}$ – величина контактных напряжений в течение процесса уплотнения; $\sigma_{\text{конт}} = (0,95–0,98) \sigma_{\text{пред}}$.

Уплотнение дорожных материалов под воздействием катков связано с циклической нагрузкой. Примерные диапазоны значений этой нагрузки приведены в табл. 2 [30].

Таблица 2

Данные о нагрузках при работе различных видов дорожных катков

Вид дорожного катка	Скорость изменения напряженного состояния, МПа/с	Время напряженного состояния за один цикл, с	Максимальное контактное давление, МПа
Двухвальцовые	2,5–30	0,04–0,25	0,7–1,2
Пневмоколесные	0,5–6,0	0,10–0,40	0,6–1,0
Вибрационные с вальцами	5,0–80	0,01–0,015	0,4–1,2

Следовательно, деформация материала зависит от:

- времени действия циклической нагрузки;
- скорости изменения напряженного состояния;
- числа уплотняющих воздействий.

Для обеспечения желаемой плотности материала и его рациональной структуры требуется соблюдение определенных параметров и режимов работы асфальтоукладчиков и дорожных катков, которые должны соответствовать физико-механическим свойствам уплотняемого материала.

Параметры вибрационных и статических дорожных катков, влияющие на их производительность и уплотняющую способность:

- конструктивные (диаметры вальцов, ширина вальцов, вес катка, линейное давление);
- вибрационные (статический момент дебалансов вибратора, частота вынужденных колебаний вальца, центробежная сила,名义альная амплитуда);
- технологические (скорость укатки, количество проходов по одному следу) [31].

Температурный режим уплотнения верхних слоев АБ смеси вибрационными гладковальцовыми катками оказывает значительное влияние на эффективность работы и качество покрытия автомобильных дорог. многими авторами установлено [32], что этот диапазон соответствует температурам 120–90 °C.

Этот диапазон возможен при использовании отряда в составе высокоеффективного асфальтоукладчика и вибрационного или статического катка тяжелого типа. При этом высокое уплотнение АБ смеси ($K_y > 0,96$) по всей ширине покрытия обеспечивают асфальтоукладчики, а катки тяжелого типа доводят уплотнение слоя дорожного покрытия до нормативных требований в рациональном диапазоне температур АБ смесей.

Учитывая объективные сложности при получении экспериментальной информации о переменных данных процессов взаимодействия уплотнителя и дорожного материала, большое значение имеет компьютерное моделирование этих процессов. Недостат-

ками разработанных ранее математических моделей процесса уплотнения являются вычислительные трудности при моделировании динамических систем, к которым относится процесс уплотнения АБ смесей как объект управления. Для повышения эффективности исследований, а также устранения этих недостатков на базе использования программного обеспечения рекомендуется использование математического аппарата метода пространства состояний, которое позволяет осуществить четкую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур [33].

В работе [34] получены математические и имитационные модели процессов взаимодействия рабочих органов асфальтоукладчиков и асфальтовых вибрационных катков с асфальтобетонными смесями, а также результаты моделирования. В качестве модели АБ смеси использована реологическая модель тела Кельвина – Фойгта. Полученные результаты позволяют перейти к конкретным задачам создания интеллектуальных систем управления (контроля) уплотнением асфальтоукладчиками и вибрационными катками, разработке киберфизической системы управления качеством уплотнения АБ смесей.

Автоматизированные системы контроля и управления процессом уплотнения АБ смесей разработаны только для вибрационных и статических катков зарубежного производства. Асфальтоукладчики оснащаются САУ нивелированием и температурным контролем поверхности дорожного покрытия при укладке смеси. Для автоматизации дорожных катков ведущие зарубежные компании разработали фирменные системы контроля, реализующие неразрушающие технологии Intelligent Compaction и Continuous Compaction Control. Технология IC, также называемая как CCC, предложена в Европе в 1970-х гг. для уплотнения грунта. Физический смысл технологии IC/CCC заключается в наличии функциональной зависимости степени уплотнения дорожного материала от его жесткости. Изменение жесткости материала оценивается по амплитудам и частотам гармонических колебаний уплотняющего органа.

За более чем 50-летний срок существования идеи IC/CCC выполнены многочисленные экспериментальных исследований в США, Европе, Японии, Китае. Современные научные исследования направлены на повышение достоверности оценки качества уплотнения средствами IC/CCC. Созданию систем IC/CCC для дорожных катков посвящены работы зарубежных ученых: D. Adam, R. Al-Zahrani, G.K. Chang, R. Anderegg, J.L. Briaud, D.J. White, S. Commuri, G. Xu и др. Авторами выполнены экспериментальные исследования этих систем в лабораторных и полевых условиях, разработаны математические модели процессов и показатель измерения интеллектуального уплотнения ICMV (Intelligent Compaction Measurement Value). В работе G. Xu, G.K. Chang [35] рассмотрены вопросы разработки математических моделей и параметрической идентификации систем IC/CCC.

Разработка и исследование систем IC/CCC на базе искусственных нейронных сетей (ИНС) посвящены работы зарубежных ученых S. Commuri, M. Barman, M. Zaman, G. Xu, G.K. Chang, S.A. Imran и др. В научных исследованиях отмечаются значительные погрешности показателей уплотнения дорожных материалов. Вопросам разработки неразрушающих технологий контроля качества уплотнения, систем автоматического непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков посвящены работы В.Б. Пермякова, А.В. Захаренко, А.А. Шестopalова, О.И. Максимычева, В.П. Ложечко, С.Н. Иванченко, Г.В. Кустарева, И.С. Тюремнова, А.С. Морева и др. В научных работах А.В. Захаренко, Г.В. Кустарева и др. рассматривались вопросы создания системы автоматического контроля уплотнения (САКУ) в процессе укладки.

В работах [36–38] предложены варианты систем автоматизации процесса уплотнения АС смесей укладчиками на базе искусственных нейронных сетей. В работе [38] приведены результаты разработки интеллектуальной САКУ асфальтобетонной смеси укладчиком, функционирующая на базе искусственной нейронной сети прямого распространения, рис. 3.

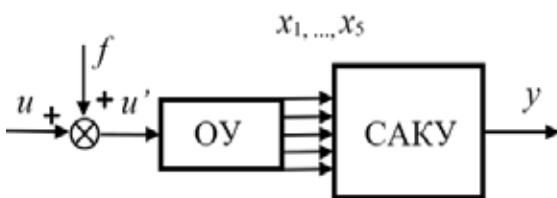


Рис. 3. Функциональная схема системы непрерывного контроля уплотнения

На этом рисунке: u – регулирующий параметр; f – возмущения; $u' = u + f$; ОУ – объект регулирования; y – регулируемый параметр (коэффициент уплотнения); x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – переменные данные: показатель типа смеси, скорость АУ, максимальное усилие в толкателе бруса, частота бруса, толщина слоя соответственно. Объект регулирования – процесс взаимодействия рабочего органа АУ (трамбующий брус – вибрационная плита) и асфальтобетонной смеси.

Функциональная модель коэффициента уплотнения, использованная при разработке интеллектуальной САКУ в процессе укладки АБ смеси [38]:

$$K_y = \theta(Type, V, F, f_t, h), \quad (3)$$

где K_y – коэффициент уплотнения АБ смеси; $Type$ – показатель типа АБ смеси; V – скорость АУ, м/мин; F – усилие в толкателе трамбующего бруса, кН; f_t – частота колебаний трамбующего бруса, Гц; h – толщина слоя, м.

Функциональная модель (3) включает данные о дорожном материале (*Type*), проектных данных слоя АБ смеси (h), режимных параметрах асфальтоукладчика (V, f_t) и динамических переменных рабочего процесса (F).

Результаты полевых испытаний компонентов системы непрерывного контроля уплотнения смеси укладчиком приведены в работе [39]. Получены временные зависимости вертикального ускорения вибрационной плиты укладчика и функциональные зависимости коэффициента уплотнения смеси от режимных параметров рабочего органа – частоты трамбующего бруса и вибрационной плиты. Результаты работы подтверждают ранее полученные автором данные о зависимости коэффициента уплотнения АБ смеси от динамических переменных рабочего процесса укладчика – вертикального ускорения вибрационной плиты, усилия в толкателе трамбующего бруса, которые использованы для разработки автоматизированных систем управления (контроля) уплотнением АБ смесей.

Задача создания киберфизической системы управления уплотнением на строительстве инфраструктурных объектов автомобильного транспорта рассмотрена в работе [40]. Для повышения эффективности технологических процессов в таких проектах требуется непрерывный контроль качества уплотнения и управление группой дорожных катков среднего и тяжелого типов. Предложены варианты интеллектуальной системы контроля и управления уплотнением асфальтобетонной смеси укладчиками и вибрационными катками, функционирующими на базе искусственной нейронной сети и цифровых ПИД-регуляторов.

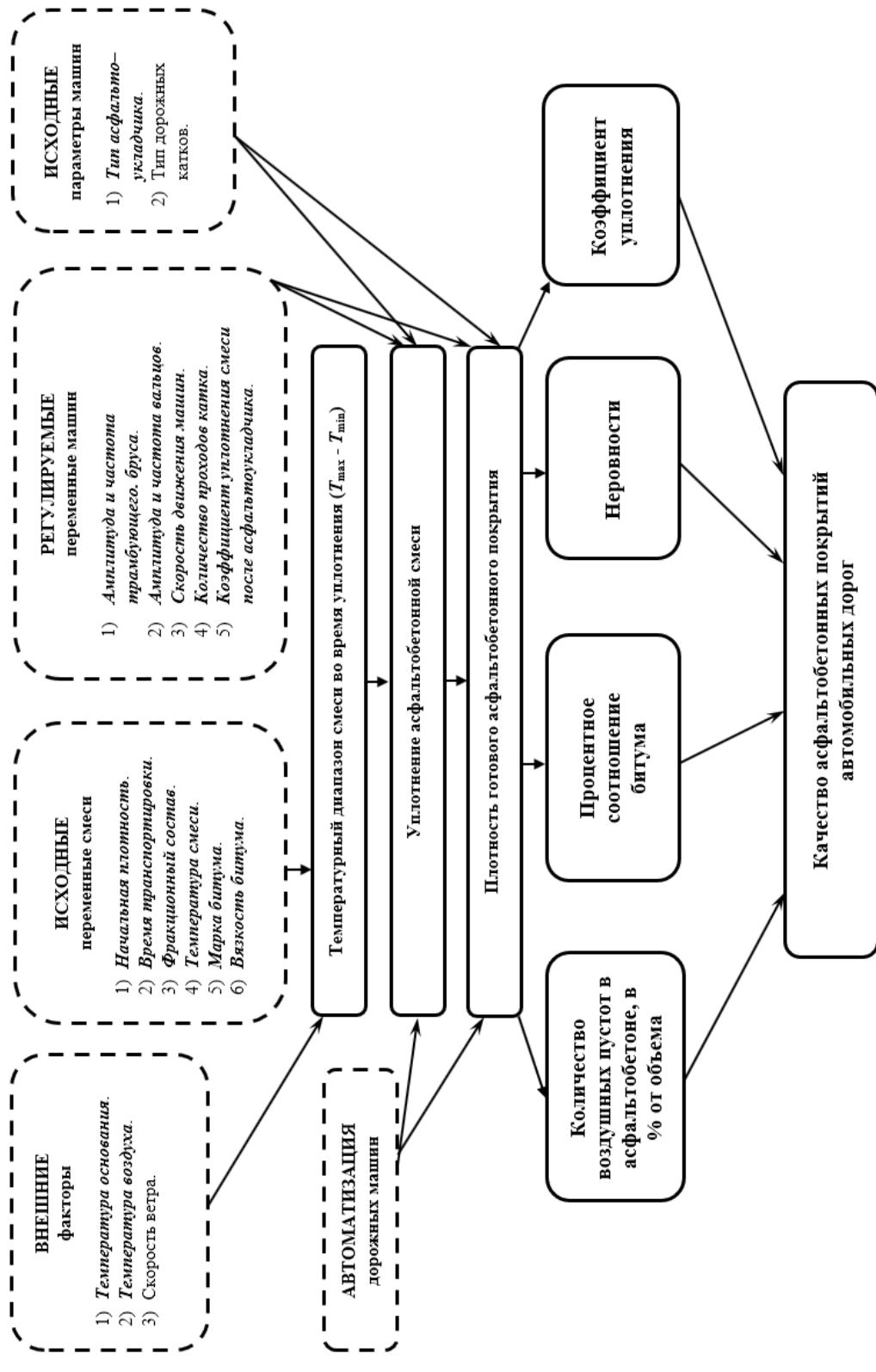


Рис. 4. Информационно-функциональная схема производственно-технологических факторов процесса уплотнения, влияющих на качество асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог

Анализ технологических процессов при строительстве АБ покрытий автомобильных дорог, внешних возмущений, вариантов комплектации отрядов дорожных машин (асфальтоукладчиков, дорожных катков) и их режимных параметров, асфальтобетонных смесей, показателей качества уплотнения асфальтобетонных смесей, результатов научных исследований в предметной области, позволил предложить информационно-функциональную схему (рис. 4) производственно-технологических факторов процесса уплотнения, влияющих на качество асфальтобетонных покрытий.

Полужирным курсивом на схеме (рис. 4) выделены факторы, оказывающие более значимое влияние на процесс уплотнения и качество асфальтобетонных покрытий. Тип асфальтоукладчика с разнообразными рабочими органами оказывает влияние на качество уплотнения при условии обеспечения максимальной уплотняющей способности в зависимости от параметров конкретного проекта строительства. Среди известных показателей качества готового АБ покрытия можно выделить показатель коэффициента уплотнения, который дает интегральную оценку уплотнения и при соблюдении нормативных показателей, позволяет сделать прогноз о высоком качестве АБ покрытий автомобильных дорог.

Формализация задачи управления качеством уплотнения дорожных покрытий осложняется отсутствием систем автоматического контроля уплотнения в процессе укладки АБ смесей и, как следствие, неполнотой информации об объекте управления, множеством возможных причин возникновения дефектов покрытий, недостатком у машинистов опыта и времени для анализа данных, полученных в режиме реального времени. Поэтому на практике полагаются на рекомендации производителей машин.

Задачи создания таких САК обусловлены сложностью процесса уплотнения асфальтобетонных смесей как объекта управления (ОУ): его многофакторностью и многорежимностью; неточностью математического описания; значительным влиянием возмущений внешней среды и дорожных материалов. Обеспечение эффективного функционирования отряда дорожных машин в процессе уплотнения асфальтобетонных покрытий связано с формированием управляющих воздействий, использующих механизмы обработки знаний, организованных с привлечением средств современных информационных технологий, что соответствует концепции интеллектуальных систем управления [9].

Рассмотренные в статье теоретические основы интеллектуального управления уплотнением относятся к приводному уровню иерархии управления, под которым понимается привод с системой управления, имеющей степень интеллектуальности в малом. По данным сравнительного анализа различных интеллектуальных технологий [9] по их общим чертам лучшие свойства для рассматриваемой области исследования имеют нейросетевые структуры. Свойство «способ реализации и обеспечиваемое относительное быстродействие» для нейросетевых структур – аппаратное, высокое [9], что удовлетворяет требованиям к системам управления мобильных, автономных, беспилотных дорожных машин.

Заключение

В статье рассмотрены теоретические основы интеллектуального управления уплотнением асфальтобетонных смесей. На базе выполненного анализа научных работ посвященных исследованиям процессов взаимодействия дорожных материалов с асфальтоукладчиками, дорожными катками, выявлены основные факторы, влияющие на управление уплотнением с учетом современных достижений в предметной области.

Для повышения качества дорожных покрытий и эффективности процесса уплотнения отрядом дорожных машин предложена идея интеллектуализации процесса управления уплотнением АБ смесей, заключающаяся в обосновании и разработке новых методов непрерывного автоматизированного контроля качества уплотнения АБ смесей, новых алгоритмов синтеза систем управления на базе современных методов модального управления и искусственного интеллекта для обеспечения заданного качества асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

Список литературы

1. Захаренко А.В., До С.Т., Чан В.Л. Рабочий орган асфальтоукладчика // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. 2013. № 10 (81). С. 157–161.
2. Захаренко А.В., Пермяков В.Б., Молокова Л.В. Дорожные катки: теория, расчет, применение: монография. СПб.: Лань, 2018. 328 с.
3. Böhmer P. Untersuchungen über die Verdichtung – Wirkung von Schwarzdeckenfertigern. Baumaschine und Bautechnik. 1974. № 7–8. P. 233–238.
4. Леонович И.И., Буртыль Ю.В. Взаимозависимости ровности покрытия и прочности дорожной одежды // Строительная наука и техника. 2011. № 1. URL: <http://www.bsc.by/story/vzaimozavisimosti-rovnosti-pokrytiya-i-prochnostidorozhnoy-odezhdы> (дата обращения: 10.10.2022).
5. Иванченко С.Н. Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.04. СПб., 1997. 37 с.

6. Яромко В.Н. О совершенствовании методов оценки качества уплотнения асфальтобетона // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 2. С. 3–5.
7. Костельев М.П., Пахаренко Д.В., Бринкс З.К. Как правильно выбрать и настроить асфальтоукладчик // Дорожная техника – 2007: кат.-справ. СПб.: ООО «Славутич», 2007. Вып. 70.
8. Костельев И.П., Пахаренко Д.В. Чем уплотнять асфальтобетон в покрытиях при смене его типа, состояния и толщины слоя // Каталог-справочник «Дорожная техника и технология» СПб., 2007. С. 70–85.
9. Остроух А.В. Интеллектуальные системы: монография. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 316 с.
10. Autonomous rollers: (R)evolution in asphalt construction. 2021. URL: <https://www.wirtgen-group.com/en-us/news-and-media/hamm/autonomous-rollers/> (дата обращения: 10.10.2022).
11. Zhang Q., Liu T., Zhang Zh., Huangfu Z., Li Q., An Z. Unmanned rolling compaction system for rockfill materials. Autom. Constr. 2019. № 100. P. 103–117. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.004.
12. Wolf P., Vierling A., Husemann J., Berns K., Decker P. Extending Skills of Autonomous Off-Road Robots on the Example of Behavior-Based Edge Compaction in a Road Construction Scenario. In: Berns K. et al. (eds), Commercial Vehicle Technology 2020/2021. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-29717-6_5.
13. Пермяков В.Б., Шапошников А.В. Исследование влияния температуры смеси и высоты образцов на прочность и плотность асфальтобетона // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. II Национальной науч.-практик. конф. 2019. С. 421–427.
14. Волков М.И., Смирнов В.М. К вопросу о физико-химических основах технологии асфальтового бетона // Труды ХАДИ. 1961. Вып. 26. С. 3–9.
15. Золотарев В.А., Корюк В.П. Качественная оценка влияния структурных и технологических факторов на уплотнение асфальтобетонных смесей // Вестник ХНАДУ. 2017. № 79. С. 94–100.
16. Edelmann M. Analytische Untersuchung zur energieeffizienten Nutzung nichtlinearer Systeme zur Asphaltverdichtung. Tätigkeitsbericht des Institutes für Automation FHNW. 2016. P. 8–11.
17. Wiss D. and Anderegg R. Efficient road compaction based on nonlinear dynamics. Int. Conf. on Innov. Tech., IN-TECH 2016. Prague. 2016. P. 55–58.
18. Wan Y., Jia J. Nonlinear dynamics of asphalt–scree interaction during compaction: Application to improving paving density. Constr. Build. Mater. 2019. № 202. P. 363–373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.205.
19. Peiling W., Nguyen V., Jianrun Zh. Experimental research and optimal control of vibration screed system (VSS) based on fuzzy control. J. Vibroeng. Vol. 22. Is. 6. 2020. P. 1415–1426. DOI: 10.21595/jve.2020.21560.
20. Калужский Я.А., Баграков О.Т. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт, 1971. 160 с.
21. Носов С.В. Моделирование эволюции деформаций и напряжений в дорожно-строительных материалах на основе реологического подхода // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 1 (53). С. 73–83.
22. Богомолов В.А., Жданюк В.К., Разницын И.Л., Богомолов С.В. Учет температурных деформаций и напряжений в вязкоупругих 3D моделях // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2015. № 69. С. 65–69.
23. Bogomolov V., Zhdanyuk V., Tsynka A. Viscoelastic structural model of asphalt concrete // Автомобильный транспорт (Харьков). 2016. № 38. С. 117–125.
24. Богомолов В.А., Жданюк В.К., Разницын И.Л., Богомолов С.В., Цинка А.А. Критерий долговечности асфальтобетонных слоев дорожных одежд // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2017. № 76. С. 74–79.
25. Богуславский А.М., Богуславский Л.А. Основы реологии асфальтобетона. М.: Высшая школа, 1972. 199 с.
26. Баловиев В.И. Оптимизация и выбор инновационных систем и процессов транспортно-технологических машин. М.: Техполиграфцентр, 2014. 392 с.
27. Баловиев В.И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин. М.: МАДИ, 2014. 148 с.
28. Справочник по асфальтоукладчикам Vögele: Советы и указания по укладке асфальтобетона асфальтоукладчиками. Wirtgen International. URL: <http://www.wirtgen.ru> (дата обращения: 10.10.2022).
29. Костельев М.П. Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона // Дорожная техника – 2009: кат.-справ. СПб.: ООО «Славутич», 2009. С. 42–52.
30. Хархута Н.Я., Капустин М.И., Семенов В.П., Эвентов И.М. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет. Л.: Машиностроение, 1976. 472 с.
31. European Standard for Road Rollers and Soil Compactors. European Standard for Vibrating Plates and Tamers. Committee for European Construction Equipment (CECE), VDMA. Frankfurt, West Germany, 1975, 1976.
32. Носов С.В. Анализ исследований взаимодействия грунтов земляного полотна и дорожных одежд с дорожными катками // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 3 (51). С. 72–82.
33. Филиповский В.М. Системы управления в пространстве состояний. СПб., 2022. 75 с.
34. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И., Турышева Е.С. Автоматизация неразрушающего контроля уплотнения дорожных материалов: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. 156 с.
35. Xu G., Chang G.K. Continuous Compaction Control – Mathematical Models and Parameter Identification. In book: Information Technology in Geo-Engineering, Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimarães, Portugal. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-32029-4_49.
36. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И. Новый метод нейросетевой системы контроля уплотнения асфальтобетонных смесей // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2021. № 9. С. 65–69. DOI: 10.37882/2223-2966.2021.09.21.
37. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10. 10 с. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235 (дата обращения: 10.10.2022).
38. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. К вопросу создания системы непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков // Программная инженерия. 2021. Том 12. № 8. С. 413–419. DOI: 10.17587/prin.12.413-419.
39. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Янаев Е.Ю., Турышева Е.С., Потапов А.Е. Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. 8 с. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465 (дата обращения: 10.10.2022).
40. Прокопьев А.П. Киберфизическая система для управления отрядом дорожных машин в инфраструктурных проектах автомобильного транспорта // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7848 (дата обращения: 10.10.2022).