РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ АВТОМАТИЗАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов, П.А. Пальчиков
Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79

Предмет исследования: управление рабочими режимами дорожно-строительных машин с учетом реализации концепции информационного моделирования автомобильной дороги. Рассмотрены состояние и проблемы развития направления совершенствования систем управления процессами дорожно-строительных машин. В работе выделяется этап дорожного строительства «укладка асфальтобетонной смеси — уплотнение», эффективное управление которым может привести к значительному улучшению качества дорожных покрытий, увеличению долговечности и уменьшению дефектов покрытий.

Цели: обоснование и направление реализации концепции интеллектуализации управления дорожно-строительными машинами.

Материалы и методы: анализ недостатков строительства асфальтобетонных дорожных покрытий, методов управления рабочими процессами дорожно-строительных машин.

Результаты: обоснованы методологические предпосылки разработки интеллектуальных систем управления дорожно-строительными машинами.

Выводы: рассмотрены возможные варианты внедрения концепции интеллектуализации систем управления дорожно-строительными машинами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожно-строительные машины, асфальтоукладчик, дорожный каток, интеллектуальное уплотнение, система управления, автоматизация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т., Пальчиков П.А. Реализация концепции автоматизации и интеллектуализации управления дорожно-строительными процессами // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 1 (112). С. 61–70.

IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT OF AUTOMATION AND INTELLECTUALIZATION OF MANAGEMENT OF ROAD CONSTRUCTION PROCESSES

A.P. Prokopyev, V.I. Ivanchura, R.T. Emelyanov, P.A. Palchikov
Siberian Federal University (SFU), 79 Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Subject: management of operating modes of road-building machines, taking into account the implementation of the concept of information modeling of the road. We have reviewed the status and the development problems for directions of improving the control systems of road-construction machine processes. In this work we focus on the road construction stage “laying asphalt-concrete – compaction”, the effective control of which can lead to significant improvement in the quality of road surfaces, increase of durability and reduction of defects in pavements.

Research objectives: rationale and directions of realization of the concept of intellectualization of the road construction management.

Materials and methods: analysis of the shortcomings of construction of asphalt-concrete pavements, analysis of the methods of workflow management of road-building machines.

Results: we have substantiated the methodological background for the development of intellectual control systems of road-building machines.

Conclusions: we considered possible ways of introducing the concept of intellectualization of management systems for road-building machines.

KEY WORDS: road construction machinery, paver, road roller, intellectual compaction, control system, automation

FOR CITATION: Prokopyev A.P., Ivanchura V.I., Emelianov R.T., Palchikov P.A. Realizatsiya kontseptsii avtomatizatsii i intellektualizatsii upravleniya dorozhno-stroitel'nyimi protsessami [Implementation of the concept of automation and intellectualization of management of road construction processes]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 1 (112), pp. 61–70.

ВВЕДЕНИЕ

Асфальтобетон остается наиболее распространенным в мире дорожным покрытием. При строительстве автомобильных дорог одним из главных показателей качества является коэффициент уплотнения, для достижения требуемого значения которого рабочие режимы дорожно-строительных машин (ДСМ) должны быть рациональными (оптимальными). Основные этапы процесса строительства верхнего асфальтобетонного покрытия: производство, транспортирование от завода до объекта, распределение, укладка и уплотнение смеси, — оказывают влияние на качественные показатели покрытия. Среди основных этапов можно выделить этап жизненного цикла покрытия — эксплуатация автомобильной дороги. Современным направлением совершенствования этапов дорожного строительства, основанного на системном подходе, является концепция BIM-технологии (Building Information Modeling) — информационное моделирование объекта. Внедрение BIM-технологий в промышленном и гражданском строительстве в соответствии с планом Минстроя России предполагается реализовать в течение трех лет. В области дорожного строительства пока идет подготовка и обсуждение возможности аналогичного внедрения.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известно о конкуренции [1] дорожных цементобетонных и асфальтобетонных покрытий в США. Специалисты по строительству асфальтобетонных покрытий обобщили достоинства и недостатки и предложили проекты сооружений со сроком службы таким же, как у цементобетонных покрытий. При условии периодической замены верхнего слоя износа с периодами от 3 до 15 лет в зависимости от их качества и условий эксплуатации срок экономической жизни жестких покрытий может составлять 50 лет.

Асфальтобетонное покрытие в процессе эксплуатации подвергается воздействиям, которые приводят к изменению структуры материала покрытия, способствуют накоплению внутренних напряжений и необратимых деформаций. Эти изменения в покрытии приводят к появлению различных дефектов и повреждений [2].

Формирование структуры асфальтобетонного покрытия, от которой зависят его прочность и долговечность, происходит в результате уплотняющего воздействия рабочих органов ДСМ — асфальтоукладчика и вибрационных катков [3].

Изменение размеров дорожных покрытий при эксплуатации — деформацию и разрушение подразделяют на дефекты и повреждения покрытия и дорожной одежды в целом [4]. К дефектам дорожной

одежды относят просадки и колеи, к ее разрушениям — проломы, пучины, разрушения кромок и трещины. К дефектам покрытия — сдвиги, волны и вмятины, к его разрушениям — износ, шелушение, выкрашивание, выбоины, трещины и сетка трещин.

Известно, что жесткое покрытие автомобильных дорог с началом эксплуатации уже имеет дефекты, полученные ранее на этапах создания (производства) [5]. К наиболее распространенным дефектам покрытия можно отнести следующие:

- микротрещины на поверхности камней (дробление горных пород при производстве щебня);
- потери легких фракций вяжущего при производстве битума;
- сегрегация смеси и старение битума (приготовление смеси на асфальтобетонном заводе);
- различные виды сегрегации (фракционная и температурная) смеси при распределении ее по ширине дороги и укладке на основание покрытия;
- нарушение гранулометрического состава при вибрационном уплотнении асфальтовыми катками.

Известно о трех основных негативных факторах, приводящих к недостаткам жестких черных покрытий [6, 7]:

- недостаточное и неоднородное качество уплотнения асфальтобетонной смеси — 50 %;
- плохое проектирование гранулометрического состава смеси — 30 %;
- пониженное качество материалов дорожно-строительной смеси, в основном битума — 20 %.

В современных условиях имеются проблемы у используемых для проектирования и строительства дорожных покрытий стандартов [3, 6, 7]. Следовательно, на основе повышения коэффициента уплотнения асфальтоукладчиком, дорожными катками даже при условии использования распространенных в Российской Федерации технологий производства асфальтобетонной смеси можно улучшить показатели качества асфальтобетонных покрытий, устраняя до пятидесяти процентов всех недостатков.

Реализация этапа дорожного строительства в системе концепции BIM-технологии предполагает использование автоматизированных укладчиков и асфальтовых катков. Научные работы [8–16], посвященные автоматизации дорожно-строительных машин, способствовали формированию теоретической основы для внедрения основных положений комплексной автоматизации управления качеством асфальтобетонных смесей с учетом процессов транспортировки, укладки и уплотнения смеси на основе современных информационных технологий, глобальных навигационных систем.

Сегрегацию асфальтобетонной смеси (температурную и фракционную), отрицательно влияющую на качество покрытия и производительность асфальтоукладчика, научились устранять с помощью пере-

грузателя асфальтовой смеси, например «Shuttle Buggy» компании ROADTEC или аналогичных.

Таким образом, совершенствование систем управления асфальтоукладчиками и вибрационными катками на основе передовых технологий автоматизации за счет получения оптимальных режимов работы при укладке и уплотнении дорожно-строительной смеси может привести к уменьшению до пятидесяти процентов всех дефектов и разрушений покрытия автомобильных дорог [6, 7]. Для Российской Федерации эта концепция является очень важным прикладным направлением для внедрения.

Исследование и уточнение параметров рабочего процесса асфальтоукладчиков и вибрационных катков, оснащенных автоматическими системами контроля и управления, с целью определения (синтеза) параметров регулятора также является актуальным научным направлением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На укладчики асфальтобетонной смеси устанавливаются приборы автоматизированной системы управления (АСУ) нивелированием покрытия, что при строительстве автомобильных дорог обеспечивает профилирование и ровность покрытия.

Но кроме профилирования укладчик может обеспечить эффективный уровень плотности покрытия при условии выбора оптимальных режимов работы. Это возможно при непрерывном контроле уплотнения смеси и автоматической настройке режимов работы трамбующего бруса, вибрационной плиты и прессующих планок. Такие системы контроля и управления в современных укладчиках отсутствуют.

Из опыта строительства автомобильных дорог известно, чем выше плотность асфальтобетонного покрытия после уплотнения укладчиком, тем ровнее и, что очень важно для России, долговечнее оно при эксплуатации [17].

Эффективность уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчиков, а также дорожно-строительных машин с технологиями горячей регенерации, имеющих подобное и аналогичное оборудование, позволяет получить необходимый коэффициент уплотнения [18].

Ручная настройка режимов уплотнения рабочими органами укладчика является неэффективной из-за отсутствия приборов текущего контроля степени уплотнения и избыточной нагрузки на машиниста-оператора. Требуется автоматизация этих функций.

Асфальтовые катки выполняют завершающий этап уплотнения. При отсутствии системы автоматического контроля и управления машинист дорожного катка настраивает режимы работы с учетом температуры предварительно уплотненной смеси. Сложность ручного управления дорожными катками заключается в том, что необходимо обеспечивать

оптимальный режим и требуемый коэффициент уплотнения. Оператор в таких условиях может совершать ошибки — недостаточное или избыточное число проходов катком, большой разброс значений коэффициента уплотнения. Устранение проблемы может быть достигнуто только при внедрении автоматизации процесса уплотнения [18].

Для автоматизации непрерывного контроля уплотнения смеси и автоматического выбора рабочих режимов вибрационных катков ведущие мировые производители предлагают адаптированные к своим типам катков АСУ процессом уплотнения (Asphalt Manager фирмы Bomag), контрольно-измерительные системы (ACE — Ammann Compaction Expert компании AMMANN) и др. АСУ позволяют выполнять непрерывный контроль коэффициента уплотнения, автоматически выбирать амплитуду и частоту колебаний вальца в зависимости от текущей скорости катка и температуры асфальтобетона [19].

При уплотнении дорожных асфальтобетонных покрытий вибрационными катками брак составляет до 65 % [20]. К основным проблемам управления процессом уплотнения можно отнести следующие: отсутствует САУ при реверсировании и изменении полосы движения; нет системы контроля температуры в процессе уплотнения.

По данным Минпромторга, в Российской Федерации производство дорожно-строительной техники катков растет [21]. Современные отечественные модели асфальтовых катков предлагаются для продажи без систем автоматического контроля и управления уплотнением, что снижает их конкурентоспособность по сравнению с зарубежными, при сопоставимом качестве конструкции и приводов механизмов.

Имеется информация о разработке собственной автоматической системы контроля уплотнения DMControl заводом «Дорожных машин» (г. Рыбинск) [22]. Но на момент написания статьи данных об экспериментальных образцах DMControl нет.

Следовательно, работа над проектом системы автоматического контроля и управления разработана с учетом современного развития сервисов сети интернет, систем навигации ГЛОНАСС и GPS, микропроцессоров способствует подготовке дорожно-строительной отрасли к внедрению технологий информационного моделирования (концепция BIM-технологии). Важнейшими инструментами для реализации BIM-технологии являются: онлайн-контроль качества уплотнения и документирование результатов дорожного строительства; регулирование рабочих режимов укладчиков и асфальтовых катков с использованием информационной модели автомобильной дороги.

С учетом современных достижений в области автоматизации укладчиков и асфальтовых катков, выделяя технологический процесс уплотнения ас-

фальтобетонной смеси рабочим органом укладчика (трамбуемый брус — вибрационная плита), вальцами катка, кроме систем управления вибрационным возбудителем и контроля уплотнения смеси можно рекомендовать разработку системы адаптивного управления двигателем, системы контроля состояния, самодиагностики, сбора, хранения и передачи данных о совокупности параметров машины, ее узлов и систем. Этого можно достичь, повышая уровень автоматизации машин до интеллектуального. В результате должны появиться термины «интеллектуальный дорожный каток», «интеллектуальный асфальтоукладчик». Пока имеющиеся сообщения с использованием этих терминов носят коммерческий рекламный характер.

Таким образом, «интеллектуализация» асфальтоукладчиков и дорожных катков будет способствовать значительному улучшению показателей дорожного строительства:

- качества уплотнения — из-за применения систем оперативного контроля уплотнения;
- производительности — за счет использования системы управления вибрационным возбудителем;
- надежности использования дорожно-строительных машин — из-за применения системы контроля параметров узлов и систем;
- расхода топлива и безвредности выбросов — из-за использования системы оптимизации работы двигателя.

На момент написания статьи, к сожалению, отечественное дорожно-строительное машиностроение пока не выпускает такую продукцию. Много нужно сделать для подготовки к внедрению в Российской Федерации информационного моделирования автомобильных дорог, в том числе и в области высшего образования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблемы внедрения систем автоматического контроля и управления. По результатам анализа доступных информационных источников можно сформулировать имеющиеся проблемы, сдерживающие разработку и внедрение автоматизированных дорожных катков [23]:

- отсутствуют конструкции отечественных многорежимных вибрационных возбудителей, позволяющих регулировать режимы работы катков в широких диапазонах вынуждающего усилия;
- российские предприятия не предлагают для укладчиков и дорожных катков системы непрерывного контроля уплотнения.

Рассмотрение вариантов адаптации на российские модели катков САУ зарубежных производителей характеризуется отсутствием коммерческой привлекательности из-за их значительной цены, достигающей до половины стоимости катка российской сборки.

По имеющейся информации о достижениях в области дорожного строительства передовой отрасли США можно сделать следующие выводы:

- в 2018 г. предполагается 100%-ное завершение проекта внедрения в отрасль технологии интеллектуального уплотнения (intelligent compaction) оснований и дорожных покрытий. Для выполнения этой задачи в США была сформирована рабочая группа, в которую вошли представители федеральных органов США (Federal Highway Administration), а также представители разработчиков и ведущих научно-исследовательских центров;

- ведущие зарубежные производители дорожных катков (Sakai, Dynapac, Caterpillar, Ammann, Bomag, Volvo) предлагают фирменные САУ с интеллектуальным уплотнением; также предлагается оснащение машин оборудованием GPS и радиосвязи;

- в течение последних нескольких лет в ведущих научно-исследовательских центрах при финансовой поддержке Администрации федеральных дорог США (Federal Highway Administration) выполнены и продолжают выполняться теоретические и экспериментальные исследования по технологии интеллектуального уплотнения. Значительность результатов его внедрения с доведением до стандартизации технологии для практического применения можно оценить по факту, что в 2018 г. исполняется 40 лет научно-исследовательской работы по дорожным каткам с непрерывным контролем уплотнения (continuous compaction control);

- в форме практических семинаров в разных штатах США организована профессиональная подготовка специалистов дорожно-строительных фирм по обучению практическим основам интеллектуального уплотнения и методам управления вибрационными катками, оснащенными САУ, стандартизации строительных работ;

- в течение года в разных штатах США проводятся опытные испытания моделей грунтовых и асфальтовых вибрационных катков с САУ различных производителей;

- технология интеллектуального уплотнения доведена до уровня стандартизации дорожно-строительных работ;

- системное внедрение комплекса мероприятий способствует значительному повышению качества и производительности дорожного строительства.

В Российской Федерации научно-исследовательские работы по этой теме ведутся преимущественно в инициативном порядке в высших учебных заведениях: СПбПУ Петра Великого, ЯГТУ, СибАДИ, МГСУ, МАДИ, ТОГУ, СФУ и др.

Учитывая текущий уровень знаний о процессах уплотнения дорожно-строительных материалов, научных и технических достижений в области разработки систем автоматического управления асфальтоукладчиками и дорожными катками, можно сформулировать задачу необходимости разработки

концепции комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей с целью повышения качества асфальтобетонных покрытий.

Концепция, цели и назначение системы. Создается автоматизированная система управления (далее — СИСТЕМА) процессами дорожно-строительного комплекта машин «укладчик — асфальтовые вибрационные катки» (ДСКМ), выполняющего непрерывно приемку, распределение, укладку и уплотнение асфальтобетонной смеси. СИСТЕМА — комплекс технических средств автоматизации и программного обеспечения, для управления режимными параметрами дорожно-строительного комплекта машин, которые без активного участия оператора настраиваются на оптимальные режимы с учетом изменения характеристик асфальтобетонной смеси, влияния возмущающих факторов для обеспечения заданной степени уплотнения смеси, высокого качества и увеличения долговечности автомобильного покрытия.

Целями создания СИСТЕМЫ являются:

- увеличение долговечности асфальтобетонного покрытия;
- снижение нагрузки на операторов машин за счет автоматизации управления процессами;
- повышение производительности дорожно-строительного комплекта машин;
- уменьшение стоимости дорожно-строительных работ.

Критериями оценки выполнения целей создания СИСТЕМЫ являются:

- увеличение производительности и уменьшение «человеческого фактора» в управлении режимами работы машин;
- заданный диапазон коэффициента уплотнения дорожного покрытия.

Разработка новых технических решений, теоретические и экспериментальные исследования, разработка проектов новых конструкций машин, рабочих органов является актуальным направлением в совершенствовании машин для строительства асфальтобетонных смесей. Базируясь на системном подходе реализации идеи концепции автоматизированной СИСТЕМЫ, разработаны новые технические решения систем автоматического управления процессами укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей [23–29].

Известны технические решения [30] автоматизированного комплекта «асфальтоукладчик — каток» базирующиеся на непрерывном контроле температуры смеси для обеспечения оперативного принятия рационального решения по изменению рабочих режимов машин. Недостатком такого варианта управления рабочими режимами является необходимость высокой квалификации оператора машины.

Для создания автоматизированной системы управления укладчиком, учитывая наличие не-

скольких технологических агрегатов с отдельными гидравлическими приводами (ходовой части; пластинчатого питателя, левого и правого; шнековых распределителей, левого и правого; гидравлического регулятора высоты рабочего органа; боковин бункера; механизма подъема рабочего органа в положение для транспортировки; трамбующего бруса/брусев; виброплиты; прессующих планок), предлагается децентрализованная система управления каждой подсистемой с объединением информационных потоков в бортовой ЭВМ машины.

Микропроцессорные регуляторы САУ агрегатами укладчика, учитывая особенности рабочего процесса и значительное влияние внешних возмущений, могут проектироваться на основе интеллектуальных (нечеткой, искусственной нейронной) технологий. Такой вариант машины может называться интеллектуальная.

К уже существующим системам управления асфальтоукладчиком предлагается использовать систему регулирования рабочим органом для обеспечения заданного коэффициента уплотнения смеси на основе нечеткой логики. Для повышения эффективности работы автоматизированных вибрационных катков данные об эффективности уплотнения смеси асфальтоукладчиком могут передаваться посредством радиосвязи. Это позволит осуществлять более точную автоматическую настройку режимов вибрации и выбор оператором скорости дорожного катка.

Автоматизированные системы с централизованным управлением вибрационными катками совершенствуются в направлении интеллектуализации процесса уплотнения. Предлагается использование в АСУ асфальтовыми катками нечетких, нейронных и гибридных нейро-нечетких цифровых регуляторов.

ВЫВОДЫ

Анализ современных исследований и проектов системам автоматизации дорожно-строительных машин позволил предложить идею совершенствования процессов управления на основе интеллектуальных технологий.

Реализация концепции ВІМ-технологии — информационного моделирования автомобильных дорог — возможна при наличии автоматизированных машин. Повышение эффективности комплекта автоматизированных дорожно-строительных машин «укладчик — асфальтовые катки», обеспечивающих укладку и уплотнение покрытия, возможно за счет внедрения интеллектуальных систем автоматического управления и обеспечения информационного взаимодействия машин комплекта с учетом их места в технологической карте.

Ориентиром для отечественного дорожно-строительного комплекса могут служить современные технологии дорожно-строительных работ (в Европе,

США, Японии), использующие автоматизированные вибрационные катки, оснащенные комплектом оборудования глобальной навигации и радиосвязи. В США такие системы становятся стандартом в отрасли, осуществляется обучение специалистов различных организаций по их применению на практике. В Российской Федерации на текущий момент работа по разработке и внедрению автоматизированных систем такого высокого уровня не имеет необходимой поддержки государства.

Предложена концепция создания автоматизированной системы управления процессами дорожно-строительного комплекса машин «укладчик — ас-

фальтовые вибрационные катки», выполняющего непрерывно приемку, распределение, укладку и уплотнение асфальтобетонной смеси: комплекс технических средств автоматизации и программного обеспечения для управления режимными параметрами дорожно-строительного комплекса машин, которые без непосредственного участия оператора настраиваются на оптимальные режимы с учетом изменения характеристик асфальтобетонной смеси, влияния возмущающих факторов для обеспечения заданной степени уплотнения смеси, высокого качества и увеличения долговечности автомобильного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирюхин Г.Н., Казарновский В.Д. О нормативной базе расчетных характеристик асфальтобетонных // Дорожная техника 2010: каталог-справ. СПб. : ООО «Славутич», 2010. С. 73–74.
2. Пермяков В.Б., Швецов В.А., Захаренко А.В. и др. Анализ негативных факторов и накопление дефектов в асфальтобетонных слоях дорожных одежд в течение жизненного цикла // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. Т. 14. № 2 (14). С. 261–265.
3. Стороженко М.С. Совершенствование технологии уплотнения асфальтобетонных покрытий с целью повышения прочности и долговечности // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2008. Вып. 40. С. 99–102.
4. Горелышева Л.А. Новые эффективные методы ремонта, содержания и совершенствования асфальтобетонных покрытий // Автомобильные дороги и мосты: обзорная информация. 2006. Вып. 5.
5. Захаренко А.В., Дегтярев А.С., Захаренко А.А. Сравнительные исследования результатов испытания образцов асфальтобетонных смесей и асфальтобетонных покрытий с применением методов и испытательного оборудования: асфальто-анализаторов типа «Инфратест», выжигания и экстрагирования по ГОСТ 12801-98. ОАО «Хантымансийскдорстрой», 2008. 19 с.
6. Костельов М.П., Перевалов В.П., Пахаренко Д.В. Способна ли Россия быстро и резко повысить качество и сроки службы своих автомобильных дорог до китайского, европейского или американского уровня? // Второй всероссийский дорожный конгресс : сб. науч. тр. М. : МАДИ, МОО «Дорож. Конгресс», 2010. С. 44–50.
7. Костельов М.П., Перевалов В.П., Пахаренко Д.В. До какого уровня (китайского, европейского или американского) следует России поднимать качество строительства и сроки службы своих новых автомобильных дорог // Дорожная техника 2011: каталог-справ. СПб. : ООО «Славутич», 2011. С. 13–26.
8. Heejune L., Schmitt R., Hui-Ping T. et al. Automated hot mix asphalt construction system by integrating productivity and material quality // Proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Munchen, Germany, 1998. Pp. 163–172. Режим доступа: http://www.iaarc.org/publications/proceedings_of_the_15th_isarc/autmated_hot_mix_asphalt_construction_system_by_integrating_productivity_and_material_quality.html.
9. Heejune L., Jeffrey S.R., Robert L.S. Computer-integrated methodologies for real-time control of asphalt paving operations // Proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Munchen, Germany, 1998. Pp. 423–431. Режим доступа: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Computer-integrated_methodologies_for_real-time_control_of_asphalt_paving_operations.PDF.
10. Heejune L., Robert L.S., Hui-Ping T. et al. Automated quality control of hot-mix asphalt construction operation // Proceedings of the 16th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Madrid, Spain, 1999. Pp. 17–22. Режим доступа: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Automated_quality_control_of_hot-mix_asphalt_construction_operation.PDF.
11. Доценко А.И. Комплексная автоматизация производства асфальтобетонной смеси с учетом влияния факторов ее транспортировки, укладки и уплотнения : автореф. дисс. ...д-ра техн. наук. М., 2006. 42 с.
12. Maksimych O.I., Karelina M.Y., Ostroukh A.V. et al. Automated control system of road construction works // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 9. Pp. 6441–6446.
13. Максимычев О.И. Концепция автоматизированной системы управления дорожно-строительными работами // Автоматизация и управление в технических системах. 2015. № 1. С. 80–91.

14. *Максимычев О.И., Васьковский А.М.* Новые направления в автоматизации технологий дорожного строительства // Вестник МАДИ. 2012. Вып. 3 (30). С. 53–57.

15. *Ватин Н.И., Колосова Н.Б., Бердюгин И.А.* Исследование методик оценки эффективности производства земляных работ // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 7 (12). С. 64–70.

16. *Ватин Н.И., Колосова Н.Б., Бердюгин И.А.* Эффективность применения систем автоматического управления AssuGrade в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 4 (9). С. 29–35.

17. *Костельов М.П., Пахаренко Д.В., Бринкс З.К.* Как правильно выбрать и настроить асфальтоукладчик // Дорожная техника 2007: каталог-справ. 2007. Вып. № 70.

18. *Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т.* Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий. Красноярск : СФУ, 2011. 148 с.

19. *Кустарев Г.В.* «Мозги» для катков — панacea или помощник? // Автомобильные дороги. 2009. № 9 (934). С. 118–121.

20. *Тюремнов И.С., Чабуткин Е.К., Окулов Р.Д.* «Интеллектуальные» катки – «интеллектуальное» уплотнение // Строительные и дорожные машины. 2008. № 8. С. 2–8.

21. Российские катки не догоняют импорт // Коммерсант. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3459875>.

22. Непрерывный поток уплотнения // Основные средства. Режим доступа: <https://os1.ru/article/9918-dorojnye-katki-s-elektronnym-upravleniem-nepreryvnyy-potok-uplotneniya>.

23. *Шестаков В.Н., Пермиков В.Б., Ворожейкин В.М., Старков Г.Б.* Технологическое обеспечение качества строительства асфальтобетонных покрытий. Омск : ОАО «Омский дом печати», 2004. 256 с.

24. Пат. РФ 97742, МПК 7 В 01 С 19/42. Система автоматического управления положением вы-

глаживающей плиты асфальтоукладчика / А.С. Климов, Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, С.С. Климов; заявит. и патентообл. Сибирский федеральный университет. Заяв. 2010108004/03; 04.03.2010; опубл. 20.09.2010; бюл. № 26–10.

25. Пат. РФ 95681, МПК 7 В 01 С 19/42. Устройство для управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси / Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, А.С. Климов; заявитель и патентообл. Сибирский федеральный университет. Заяв. 2009118046/22; 12.05.2009; опубл. 10.07.2010, бюл. № 19–10.

26. Пат. РФ 105307, МПК Е 01 С 19/48. Система автоматического управления асфальтоукладчика / А.С. Климов, Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, С.С. Климов, А.И. Авласевич; заявит. и патентообл. Сибирский федеральный университет. Заяв. 2011106074/03; 17.02.2011; опубл. 10.06.2011, бюл. № 16_11.

27. Пат. РФ 106627, МПК Е 01 С 23/07. Система автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси катком / А.С. Климов, Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, С.С. Климов, И.Б. Оленев, Е.С. Турышева; заявит. и патентообл. Сибирский федеральный университет. Заявл. 2011109346/03; 11.03.2011 ; опубл. 11.07.2011, бюл. № 20_11. 2 с.

28. Пат. РФ 2499095, МПК Е 01 С 23/07 (2006.01). Цифровая адаптивная система управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси / А.С. Климов, Р.Т. Емельянов А.П. Прокопьев, С.С. Климов; заявит. и патентообл. Сибирский федеральный университет. Заявл. 11.04.2012; № 2012114326/03; опубл. 20.11.2013, бюл. № 32.

29. *Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И.* Методы управления технологическими процессами строительства асфальтобетонных покрытий. Красноярск : СФУ, 2012. 255 с.

30. US Patent 8099218 МПК G06F19/00. Paving system and method / Glee K.C. Potts D.R., Corcoran P.T., Rasmussen T.L.; assignee: Caterpillar Inc. (Peoria, IL, US); application number 11/998660; publication date 01/17/2012.

Поступила в редакцию 8 октября 2017 г.

Принята в доработанном виде 13 ноября 2017 г.

Одобрена для публикации 26 декабря 2017 г.

О Б АВТОРАХ: **Прокопьев Андрей Петрович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий строительства, Инженерно-строительный институт, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82, prokl@yandex.ru;

Иванчура Владимир Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82, ivan43ura@yandex.ru;

Емельянов Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и технологий строительства, Инженерно-строительный институт, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82; ert-44@yandex.ru;

Пальчиков Павел Анатольевич — аспирант кафедры автомобильных дорог и городских сооружений, Инженерно-строительный институт, Сибирский федеральный университет (СФУ), 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82, ert-44@yandex.ru.

REFERENCES

1. Kiryukhin G.N., Kazarnovskiy V.D. O normativnoy baze raschetnykh kharakteristik asfal'tobetonov [On the normative base of design characteristics of asphalt concrete]. *Dorozhnaya tekhnika 2010: katalog-sprav.* [Road machinery 2010: reference catalog]. Saint-Petersburg, ООО «Slavutich», 2010. Pp. 73–74. (In Russian)
2. Permyakov V.B., Shvetsov V.A., Zakharenko A.V. et al. Analiz negativnykh faktorov i nakopleniye defektov v asfal'tobetonnykh sloyakh dorozhnykh odezhd v techeniye zhiznennogo tsikla [The analysis of negative factors and accumulation of defects in asphaltconcrete layers of road clothes during life cycle]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Kazan State University of Architecture and Engineering News]. 2010, vol. 14, no. 2 (14), pp. 261–265. (In Russian)
3. Storozhenko M.S. Sovershenstvovanie tekhnologii uplotneniya asfal'tobetonnykh pokrytiy s tsel'yu povysheniya prochnosti i dolgovechnosti [Improvement of the technology of compaction of asphalt-concrete coatings in order to increase strength and durability]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]. 2008, issue 40, pp. 99–102. (In Russian)
4. Gorelysheva L.A. Novye effektivnye metody remonta, soderzhaniya i sovershenstvovaniya asfal'tobetonnykh pokrytiy [New effective methods of repair, maintenance and improvement of asphalt-concrete coatings]. *Avtomobil'nye dorogi i mosty: obzornaya informatsiya* [Automobile roads and bridges: overview information]. 2006. Issue 5. (In Russian)
5. Zakharenko A.V., Degtyarev A.S., Zakharenko A.A. *Sravnitel'nye issledovaniya rezul'tatov ispytaniya obraztsov asfal'tobetonnykh smesey i asfal'tobetonnykh pokrytiy s primeneniem metodov i ispytatel'nogo oborudovaniya: asfal'to-analizatorov tipa «Infratest», vyzhiganiya i ekstragirovaniya po GOST 12801-98* [Comparative studies of test results for asphalt-concrete mixtures and asphalt-concrete coatings using methods and testing equipment: asphalt analyzers of the "Infratest" type, burning and extraction according to RF standard GOST 12801-98]. OAO «Khantyngmanskidorstroy», 2008. 19 p. (In Russian)
6. Kostel'ov M.P., Perevalov V.P., Pakharenko D.V. Sposobna li Rossiya bystro i rezko povysit' kachestvo i sroki sluzhby svoikh avtomobil'nykh dorog do kitayskogo, evropeyskogo ili amerikanskogo urovnya? [Is Russia able to quickly and dramatically improve the quality and service life of its roads to the Chinese, European or American level?]. *Vtoroy vserossiyskiy dorozhnyy kongress : sb. nauch. tr.* [Second All-Russian Road Congress : collected scientific papers]. Moscow, Moscow Auto Road Institute, MOO «Dorozh. Kongress», 2010, pp. 44–50. (In Russian)
7. Kostel'ov M.P., Perevalov V.P., Pakharenko D.V. Do kakogo urovnya (kitayskogo, evropeyskogo ili amerikanskogo) sleduet Rossii podnimat' kachestvo stroitel'stva i sroki sluzhby svoikh novykh avtomobil'nykh dorog [To what level (Chinese, European or American) should Russia raise the quality of construction and the service life of its new highways]. *Dorozhnaya tekhnika 2010 : katalog-sprav.* [Road machinery 2010: reference catalog]. Saint-Petersburg: ООО «Slavutich», 2011. Pp. 13–26. (In Russian)
8. Heejune L., Schmitt R., Hui-Ping T. et al. Automated hot mix asphalt construction system by integrating productivity and material quality. *Proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Munchen, Germany, 1998.* Pp. 163–172. Available at: http://www.iaarc.org/publications/proceedings_of_the_15th_isarc/autmated_hot_mix_asphalt_construction_system_by_integrating_productivity_and_material_quality.html.
9. Heejune L., Jeffrey S.R., Robert L.S. Computer-integrated methodologies for real-time control of asphalt paving operations. *Proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Munchen, Germany, 1998.* Pr. 423–431. Available at: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Computer-integrated_methodologies_for_real-time_control_of_asphalt_paving_operations.PDF.
10. Heejune L., Robert L.S., Hui-Ping T. et al. Automated quality control of hot-mix asphalt construction operation. *Proceedings of the 16th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Madrid, Spain, 1999.* Pp. 17–22. Available at: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Automated_quality_control_of_hot-mix_asphalt_construction_operation.PDF.
11. Dotsenko A.I. *Kompleksnaya avtomatizatsiya proizvodstva asfal'tobetonnoy smesi s uchetom vliyaniya faktorov ee transportirovki, ukladki i uplotneniya : avtoref. diss. ...d-ra tekhn. nauk* [Complex automation of production of asphalt-concrete mixture taking into account the influence of factors of its transportation,

stacking and compaction : author's abstract of thesis of doctor of technical sciences]. Moscow, 2006. 42 p. (In Russian)

12. Maksimychiev O.I., Karelina M.Y., Ostroukh A.V. et al. Automated control system of road construction works. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no 9, pp. 6441–6446. (In Russian)

13. Maksimychiev O.I. Kontseptsiya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya dorozhno-stroitel'nymi rabotami [Concept of an automated control system for road construction works]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Automation and control in technical systems]. 2015, no. 1, pp. 80–91. (In Russian)

14. Maksimychiev O.I., Vas'kovskiy A.M. Novye napravleniya v avtomatizatsii tekhnologii dorozhnogo stroitel'stva [New directions in automation of the road building technologies]. *Vestnik MADI* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University]. 2012, issue 3 (30), pp. 53–57. (In Russian)

15. Vatin N.I., Kolosova N.B., Berdyugin I.A. Issledovanie metodik otsenki effektivnosti proizvodstva zemlyanykh rabot [Investigation of methods for assessing the efficiency of excavation work]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2013, no. 7 (12), pp. 64–70. (In Russian)

16. Vatin N.I., Kolosova N.B., Berdyugin I.A. Effektivnost' primeneniya sistem avtomaticheskogo upravleniya AccuGrade v stroitel'stve [effectiveness of the use of automatic control systems AccuGrade in construction]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2013, no. 4 (9), pp. 29–35. (In Russian)

17. Kostel'ov M.P., Pakhareno D.V., Brinks Z.K. Kak pravil'no vybrat' i nastroit' asfal'toukladchik [How to choose and set up an asphalt paver correctly]. *Dorozhnaya tekhnika 2007 : katalog-sprav.* [Road machinery 2007: reference caralog]. 2007. Issue 70. (In Russian)

18. Prokop'ev A.P., Emel'yanov R.T. *Kompleksnaya avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov ustroystva dorozhnykh pokrytiy* [Complex automation of technological processes for the installation of road surfaces]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011. 148 p. (In Russian)

19. Kustarev G.V. «Mozgi» dlya katkov — panatsiya ili pomoshchnik? ["Brains" for skating rinks — a panacea or helper?]. *Avtomobil'nye dorogi* [Auto Roads]. 2009, no. 9 (934), pp. 118–121. (In Russian)

20. Tyuremnov I.S., Chabutkin E.K., Okulov R.D. «Intellektual'nye» katki — «intellektual'noe» uplotnenie ["Intelligent" rollers — "intelligent" sealing]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and Road Machines]. 2008, no. 8, pp. 2–8. (In Russian)

21. Rossiyskie katki ne dogonyayut import [Russian rollers do not catch up with imports]. *Kommersant* [Kommersant]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/3459875>. (In Russian)

22. Nepreryvnyy potok uplotneniya [Continuous flow of compaction]. *Osnovnye sredstva* [Fixed assets]. Available at: <https://os1.ru/article/9918-doroznye-katki-s-elektronnym-upravleniem-nepreryvnyy-potok-uplotneniya>. (In Russian)

23. Shestakov V.N., Permyakov V.B., Vorozheykin V.M., Starkov G.B. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva stroitel'stva asfal'tobetonnnykh pokrytiy* [Technological support of quality of construction of asphalt-concrete coatings]. Omsk, OAO «Omskiy dom pečati» Publ., 2004. 256 p. (In Russian)

24. Patent RF 97742, IPC 7 V 01 S 19/42. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya polozheniem vyglazhivayushchey plity asfal'toukladchika* [Automatic control system for the position of the asphalt paver smoothing plate]. A.S. Klimov, R.T. Emel'yanov, A.P. Prokop'ev, S.S. Klimov; claimer & patentholder Siberian federal university; claim 2010108004/03; 04.03.2010; published 20.09.2010; bul. no. 26–10. (In Russian)

25. Pat. RF 95681, IPC 7 V 01 S 19/42. *Ustroystvo dlya upravleniya protsessom uplotneniya asfal'tobetonnnoy smesi* [Device for controlling the process of compaction of asphalt mix]. R.T. Emel'yanov, A.P. Prokop'ev, A.S. Klimov; claimer & patentholder Siberian federal university; claim 2009118046/22; 12.05.2009; published 10.07.2010, bul., no. 19–10. (In Russian)

26. Pat. RF 105307, IPC E 01 S 19/48 *Sistema avtomaticheskogo upravleniya asfal'toukladchika* [Automatic control system for paver]. A.S. Klimov, R.T. Emel'yanov, A.P. Prokop'ev, S.S. Klimov, A.I. Avlasevich; claimer & patentholder Siberian federal university; claim 2011106074/03; 17.02.2011; published 10.06.2011, bul. no. 16–11. (In Russian)

27. Pat. RF 106627, IPC E 01 S 23/07. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya protsessom uplotneniya asfal'tobetonnnoy smesi katkom* [Automatic control system for the compacting of asphalt mixes]. A.S. Klimov, R.T. Emel'yanov, A.P. Prokop'ev, S.S. Klimov, I.B. Olenov, E.S. Turysheva; claimer & patentholder Siberian federal university; claim 2011109346/03; 11.03.2011; published 11.07.2011, bul. no. 20_11. (In Russian)

28. Pat. RF 2499095, IPC E 01 S 23/07 (2006.01). *Tsifrovaya adaptivnaya sistema upravleniya protsessom uplotneniya asfal'tobetonnnoy smesi* [Digital adaptive control system for the process of compaction of asphalt-concrete mixture], A.S. Klimov, R.T. Emel'yanov A.P. Prokop'ev, S.S. Klimov; claimer & patentholder Siberian federal university; claim 11.04.2012; № 2012114326/03; published 20.11.2013, bul. no. 32. (In Russian)

29. Prokop'ev A.P., Emel'yanov R.T., Ivanchura V.I. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*

stroitel'stva asfal'tobetonnykh pokrytiy [Methods of managing technological processes for the construction of asphalt concrete pavements]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2012. 255 p. (In Russian)

30. US Patent 8099218, IPC G06F19/00. *Paving system and method*. Glee K.C. Potts D.R., Corcoran P.T., Rasmussen T.L.; assignee: Caterpillar Inc. (Peoria, IL, US); application number 11/998660; publication date 01/17/2012.

Received October 8, 2017.

Adopted in final form on November 13, 2017.

Approved for publication on December 26, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Prokop'ev Andrey Petrovich** — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Construction Materials and Construction Technology, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy Prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; prok1@yandex.ru;

Ivanchura Vladimir Ivanovich — Doctor of Technical Science, Professor, Department of Automation System, Automated Management and Engineering, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ivan43ura@yandex.ru;

Emelyanov Ryurik Timofeevich — Doctor of Technical Science, Professor, Department of Construction Materials and Construction Technology, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ert-44@yandex.ru;

Pal'chikov Pavel Anatol'evich — Postgraduate Student, Department of Roads and Urban Buildings, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy Prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ert-44@yandex.ru.