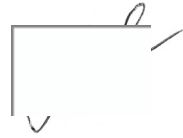


На правах рукописи



Мейке Ульяна Николаевна

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН
ДЛЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Добромиров Виктор Николаевич.

Официальные оппоненты: **Воронов Юрий Евгеньевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
кафедра автомобильных перевозок, профессор;

Афанасьев Александр Сергеевич,
кандидат военных наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет», кафедра
транспортно-технологических процессов
и машин, заведующий.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет».**

Защита состоится «15» июня 2023 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» СПбГАСУ по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/meuqe-ulyana-nikolaevna>.

Автореферат разослан «4» мая 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Е. В. Куракина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для России развитие автомобильно-дорожной сети является важной стратегической задачей, имеющей ключевое значение в обеспечении роста экономики страны. Важную роль в функционировании системы дорожного строительства играет обеспеченность работ транспортно-технологическими средствами и комплексами. Высокая стоимость механизации дорожного строительства определяет повышенный интерес производителей работ к рациональному выбору дорожно-строительных машин из значительного количества моделей, представленных на рынке в одних типоразмерах. Существующие методы оценки конкурентоспособности машин сложны и наукоемки, а их проведение в отношении всех моделей типоразмерного ряда весьма трудоемко. Представляется целесообразным предварительный отбор для сравнения минимального числа потенциально лидирующих образцов, основанный на экспресс-оценке их технического уровня (ТУ). Широко используемые в современной практике научные методы таких оценок основаны на проведении экспертных исследований по обоснованию номенклатуры и степени значимости каждого из показателей эксплуатационных свойств машин, используемых при оценке ТУ образца. Однако установлено, что такой подход может давать неоднозначные и неочевидные результаты в определении приоритета при выборе образца. Это в полной мере относится и к дорожно-строительным машинам. В такой ситуации являются актуальными как усовершенствование традиционных методов сравнительной оценки их ТУ в части повышения объективности и информативности, так и разработка новых теоретических подходов к решению этой задачи.

Степень разработанности темы исследования. Оценка конкурентоспособности и технического уровня, как комплексного показателя качества промышленной продукции, базируются на основополагающих трудах ученых американской, японской и европейской школ всеобщего управления качеством У.Э. Шухарта, Д. Гарвина, Э. Доминга, Д. Джурана, Исикавы, Кано и др., обобщенных в 1970–1980-х годах прошлого века советскими учеными А.В. Гличевым и Я.Б. Шором. Современные подходы нашли отражение в трудах многих российских исследователей: Афанасьева А.С., Басманова С.В., Буянкина А.В., Воронова А.Ю., Воронова Ю.Е., Глебова А.В., Загребельной Н.С., Клековкина В.С., Козловского В.Н., Костина И.М., Криштalia Н.В., Крылова В.П., Лифица И.М., Поповой Е.В., Репина С.В., Романенко А.А., Смирновой О.В., Смирнова П.И., Тарана В.А., Фасхиева Х.А., Шайхутдинова И.Ф. и др. Обзор их работ показывает, что эти вопросы остаются крайне актуальным, однако, несмотря на это, общепринятого подхода к оценке технического уровня большинства видов промышленной продукции не существует. Современные исследователи предлагают свой состав и значимость показателей эксплуатационных свойств для оценки, что формирует

индивидуальные особенности каждого вновь разработанного метода. Основным принципом формирования перечня показателей для оценки технического уровня является выбор свойств объекта, отражающих для потребителя максимальный полезный эффект при его эксплуатации. Этим объясняется стремление к увеличению количества оценочных показателей, что, однако повышает объективность оценки крайне незначительно. Отмечается проблематичность применения традиционных экспертных методов в условиях высокой схожести значений показателей эксплуатационных свойств машин, что характерно для современного уровня развития техники, технологий и регламентации требований по безопасности, эргономичности и экологичности. Это снижает информативность традиционных методов и очевидность в выборе приоритета. Указанные противоречия послужили основанием для постановки цели диссертационного исследования.

Цель исследования – усовершенствование существующих и разработка новых научных методов сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин (ТТМ) для дорожно-строительной отрасли, обеспечивающих обоснованный выбор потребителем конкурентоспособных моделей.

Задачи исследования.

1. Исследование перспектив развития дорожно-строительного производства в РФ и современного состояния его обеспечения средствами механизации.

2. Анализ традиционных методов оценки ТУ продукции машиностроения, исследование возможности их адаптации к применению в интересах определения ТУ транспортно-технологических машин дорожно-строительного назначения.

3. Уточнение традиционных методов в интересах оценки ТУ землеройных машин, как одного из наиболее представительных видов ТТМ дорожно-строительного назначения, путем обоснования на основе экспертных исследований номенклатуры значимых показателей эксплуатационных свойств, коэффициентов их весомости в формировании ТУ и распределения по функциональным кластерам.

4. Оценка информативности уточненных традиционных методов и обоснование областей их целесообразного применения в задачах определения ТУ и направлений конструктивного усовершенствования транспортно-технологических средств (на примере землеройных машин).

5. Разработка метода безэкспертной сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин на основе многокритериальной оптимизационной математической модели.

6. Разработка алгоритма и программного обеспечения для компьютерной реализации метода сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин на основе многокритериальной оптимизационной математической модели.

7. Апробация разработанного метода путем оценки его информативности в сравнении с традиционными методами при определении технического уровня машин.

Объект исследования – транспортно-технологические машины дорожно-строительного назначения.

Предмет исследования – методы оценки технического уровня транспортно-технологических машин для дорожно-строительной отрасли.

Рабочая гипотеза. При принятии потребителем решения о выборе ТТМ в условиях неопределенности в перечне значимых показателей их эксплуатационных свойств, необходимости сравнения показателей, обладающих высокой схожестью значений, недостаточной информативности существующих методов оценки ТУ полагаться на опыт экспертов недостаточно. Для решения таких задач целесообразно использовать многокритериальные оптимизационные математические модели, обеспечивающие выбор машины на основе полного перебора всех возможных вариантов приоритетов значимости исследуемых показателей эксплуатационных свойств.

Научная новизна исследования:

1. Обоснована номенклатура значимых показателей эксплуатационных свойств землеройных дорожно-строительных машин (экскаваторов, бульдозеров, скреперов и строительных автосамосвалов), рекомендуемых к применению для оценки их ТУ, предложена кластеризация этих показателей для каждого из указанных видов машин, обоснованы коэффициенты весомости единичных и комплексных показателей их эксплуатационных свойств.

2. Уточнены традиционные методы оценки ТУ изделий промышленного производства в применении к транспортно-технологическим дорожно-строительным машинам с позиции определения предпочтений в выборе образцов потребителем, отличающиеся использованием обоснованно минимизированного перечня значимых показателей свойств, предложенным их распределением в кластеры и применением предлагаемых коэффициентов их весомости. Обоснованы области целесообразного применения этих методов при оценке ТУ и направлений конструктивного совершенствования машин.

3. Разработан метод безэкспертного обоснования предпочтений потребителя в выборе ТТМ из предлагаемого ряда на основе сравнительной оценки их ТУ с использованием многокритериальной оптимизационной математической модели.

4. Разработан алгоритм и программное обеспечение для компьютерной реализации метода сравнительной оценки образцов с использованием многокритериальной оптимизационной математической модели.

Теоретическая значимость исследования состоит в дальнейшем развитии научно-методических подходов к оценке технического уровня изделий машиностроения в части повышения их объективности и информативности.

Предложен новый метод безэкспертной оценки приоритета при выборе образца потребителем на основе использования многокритериальной оптимизационной математической модели и разработано программное обеспечение его реализации.

Практическая значимость исследования. Предложенные усовершенствованные методы оценки ТУ транспортно-технологических машин и определения путей его повышения, обладающие повышенной объективностью и информативностью, предлагается использовать в практической деятельности потребителей для первичного обоснования приоритета при выборе ими образца из предлагаемого перечня машин одного типоразмера, а также производителями машин при определении направлений их технического совершенствования.

Реализация результатов исследования. Результаты исследования используются при выборе моделей землеройных и транспортных машин для пополнения парков дорожно-строительной техники предприятиями ООО «Лидер-Строй» (г. Нижний Новгород) при ремонте и строительстве автомобильной дороги М7 «Волга», АО «ПО РосДорСтрой» (Новгородская обл., г. Валдай) при обслуживании кольцевой автомобильной дороги А118, ООО «Миларин» (г. Санкт-Петербург) для обоснования рационального состава автомобильного парка предприятия, а также внедрены в учебный процесс СПбГАСУ при изучении дисциплин «Автотракторный транспорт» (специальность 23.05.01 НТТС, Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование) и «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» (направление подготовки 15.04.03 ПМХ, Вычислительная механика транспортных систем).

Методологическая основа исследования. Выполненные исследования базируются на использовании общенаучных методов анализа и синтеза. Для обоснования номенклатуры и коэффициентов весомости показателей свойств проведены экспертные исследования, корректность которых проверена по показателю согласованности мнений экспертов – коэффициенту конкордации. Оценка ТУ сравниваемых образцов проведена методами прямого и кластерного ранжирования, а также методом матричного анализа. Разработка метода безэкспертной сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин базируется на классических положениях теории вероятностей и многокритериальной оптимизации.

Положения, выносимые на защиту.

1. Номенклатура показателей значимых эксплуатационных свойств для проведения потребителем сравнительных оценок ТУ землеройных машин, система их кластеризации, коэффициенты весомости единичных и комплексных показателей.

2. Уточненные методы экспертной сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин, результаты исследования их состоятельности

и применимости при обосновании приоритета в выборе потребителем (на примере землеройных машин).

3. Метод сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин с использованием многокритериальной оптимизационной математической модели.

4. Результаты апробации разработанного метода путем оценки его информативности в сравнении с традиционными методами при определении технического уровня машин.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, а именно: п.2. «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов с учетом полного жизненного цикла изделий, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации»; п.4. «Техническая эксплуатация транспортно-технологических средств и их комплексов».

Достоверность исследования. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций определяется корректностью поставленных задач, решение которых базируется на использовании фундаментальных и достоверно изученных научных положений, обеспечивается использованием современного математического аппарата, апробированных методик теоретических исследований, привлечением к экспертным исследованиям высококвалифицированных специалистов.

Апробация результатов работы. Результаты работы обсуждались на 70-й, 72-й, 74-й и 75-й научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2017, 2019, 2021, 2022 гг.); II и V Всероссийских межвузовских конференциях «Магистерские слушания» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2017 и 2020 гг.); 25-й московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (г. Москва, 2021 г.); I и II Международной конференции «Транспортная доступность Арктики: Сети и системы» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2021 и 2022 гг.); XXXV Национальной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей и технический сервис автомобилей, тракторов и двигателей», посвященной 100-летию Инженерно-технологического факультета (г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, СПбГАУ, 2022 г.); LXXVI Научной конференции профессорско-преподавательского состава

и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 18 – 21 октября 2022 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе пять в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК РФ, две публикации в журналах наукометрической базы Scopus/WoS, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка из 116 использованных источников. Объем диссертации составляет 156 страниц машинописного текста, содержит 57 таблиц и 32 рисунка.

Во введении обоснована актуальность исследования, определены его цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния и перспектив развития дорожно-строительной отрасли в РФ, исследованы возможности отечественной промышленности по производству дорожно-строительных машин в условиях санкционных ограничений. Представлен обзор современных научных подходов к оценке технического уровня изделий машиностроения, выявлены проблемные вопросы их практического применения. Обоснованы цель и задачи исследования.

Во второй главе обоснованы минимально достаточная номенклатура значимых показателей эксплуатационных свойств землеройных ТТМ, предложения по их группированию и весомости для проведения сравнительной оценки ТУ. Установлена недостаточная информативность традиционных методов при сравнении машин, обладающих высокой схожестью значений используемых показателей. Рекомендованы целесообразные области применения таких методов в отношении оценки ТУ машин.

В третьей главе обоснован подход к безэкспертной сравнительной оценке ТУ транспортно-технологических машин путем многокритериальной оптимизации. Разработана математическая модель, основанная на полном переборе всех вариантов приоритетов выбранных значимых эксплуатационных свойств. Разработаны алгоритм и программное обеспечение ее реализации.

В четвертой главе проведено сравнение информативности предложенного и традиционных методов. Установлено, что применение разработанного метода позволяет при выборе машин по ограниченному перечню параметров, обладающих высокой схожестью значений, однозначно определять приоритеты их технического уровня, что проблематично при использовании традиционных методов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Номенклатура показателей значимых эксплуатационных свойств для проведения потребителем сравнительных оценок ТУ землеройных машин, система их кластеризации, коэффициенты весомости единичных и комплексных показателей

Стремление современных исследователей к расширению перечня показателей свойств изделий для оценки их ТУ ведет к значительному усложнению расчетов, однако повышает объективность результата крайне несущественно. При этом значения многих предлагаемых показателей регламентированы требованиями нормативных документов, либо, являясь значимыми для производителя, не являются значимыми для потребителя, что определяет нецелесообразность их использования при оценке ТУ машин в интересах обоснования предпочтений в выборе машины для приобретения. Проведенные исследования по нескольким представительным видам дорожно-строительных машин показали достаточность использования для этих целей не более 9-ти значимых показателей, определяющих конструктивно-расчетную производительность машин и легко доступных потребителю из перечня их технических характеристик. Обоснованность такого подхода проверена путем экспертных исследований с рассмотрением и согласованием экспертами предлагаемого автором минимально необходимого перечня значимых единичных показателей эксплуатационных свойств для оценки ТУ машин, распределением их по функциональным кластерам, назначением коэффициентов весомости единичных и комплексных показателей. Корректность групповой оценки определялась по коэффициенту конкордации.

Рекомендуемая по результатам исследования номенклатура значимых показателей ТУ землеройных машин приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Номенклатура значимых показателей эксплуатационных свойств землеройных машин

Вид машины	Рекомендуемые в качестве значимых показатели ТУ
Экскаватор	Вместимость ковша, глубина копания, высота подъёма, продолжительность рабочего цикла, радиус рабочей зоны, среднее давление на грунт, удельная мощность, преодолеваемый уклон пути, скорость машины
Бульдозер	Максимальная скорость вперед, максимальная скорость назад, ширина отвала, максимальное расстояние перемещения породы, габаритная ширина машины, удельное давление на грунт, удельная мощность двигателя, расход топлива, емкость топливных баков

Окончание табл. 1

Вид машины	Рекомендуемые в качестве значимых показатели ТУ
Скрепер	Грузоподъемность, эксплуатационная масса, удельная мощность двигателя, вместимость ковша, ширина резания (ковша), толщина слоя отсыпки, максимальное заглубление, максимальная скорость движения, минимальная ширина полосы разворота
Автосамосвал	Грузоподъемность, объем кузова, удельная мощность двигателя, максимальная скорость движения, число передач в трансмиссии, запас хода, максимальная нагрузка на односкатный мост, сцепной вес машины, минимальный радиус поворота

Результаты экспертной оценки значимости показателей эксплуатационных свойств автосамосвалов при определении их ТУ методом *прямого ранжирования* по 9-ти показателям приведены в таблице 2. Полученное значение коэффициента конкордации $W = 0,52$ говорит о средней степени согласованности мнений экспертов, что свидетельствует о возможности применения полученных коэффициентов весомости при определении ТУ автосамосвалов этим методом.

Таблица 2 – Коэффициенты весомости показателей эксплуатационных свойств автосамосвалов при оценке ТУ методом прямого ранжирования

Показатель	Грузоподъемность, т	Максимальная нагрузка на ось, кН	Удельная мощность двигателя, кВт/т	Запас хода, км	Число передач в трансмиссии	Объем кузова, м ³	Максимальная скорость движения, м/с	Минимальный радиус поворота, м	Сцепной вес, кН
Ранг	1	6	2	4	9	3	5	7	8
Коэффициенты весомости									
	0,157	0,093	0,156	0,142	0,044	0,151	0,120	0,084	0,053

При определении ТУ землеройных машин методом *кластерного ранжирования* все значимые показатели предлагается распределить по группам: функциональности, маршевой и маневровой подвижности.

Рекомендуемые по результатам экспертных исследований распределения значимых показателей машин по кластерам, а также весомость каждого показателя и кластера для оценки ТУ приведены на рисунках 1–4.

Оценка согласованности мнений экспертов по кластерному ранжированию значимости показателей ТУ установила высокую согласованность мнений экспертов по комплексным показателям (более 0,7) и среднюю согласованность – по единичным в кластерах (от 0,3 до 0,7). Полученные

уровни согласованности по всем исследованным машинам свидетельствуют о достаточной корректности их оценок и допустимости использования полученных коэффициентов весомости для проведения оценок ТУ методом кластерного ранжирования.



Рис. 1. Распределение показателей эксплуатационных свойств автосамосвалов по группам и коэффициенты их весомости



Рис. 2. Распределение показателей эксплуатационных свойств экскаваторов по группам и коэффициенты их весомости

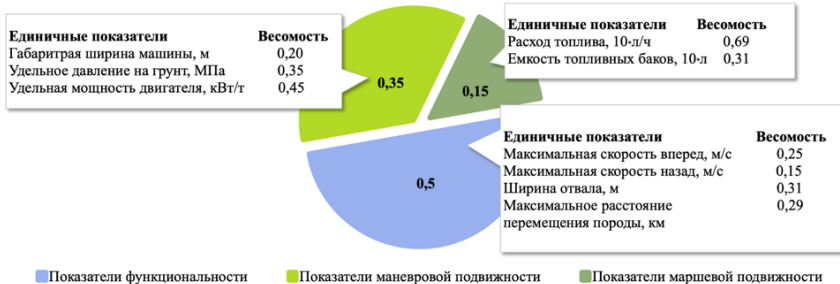


Рис. 3. Распределение показателей эксплуатационных свойств бульдозеров по группам и коэффициенты их весомости

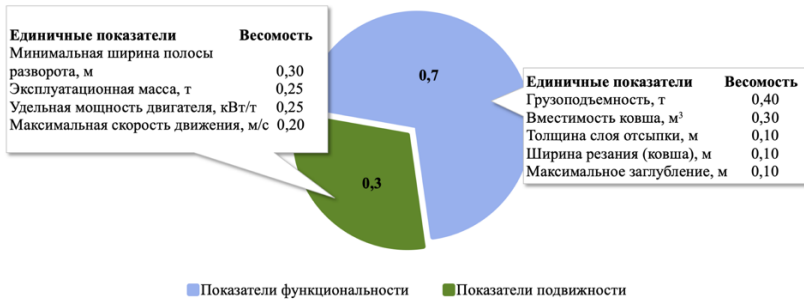


Рис. 4. Распределение показателей эксплуатационных свойств скреперов по группам и коэффициенты их весомости

Уточненные методы экспертной сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин, результаты исследования их состоятельности и применяемости при обосновании приоритета в выборе потребителем (на примере землеройных машин)

Уточнения выполнены в отношении трех наиболее распространенных традиционных методов сравнительной оценки ТУ машин: матричного анализа, экспертного прямого и кластерного ранжирования показателей эксплуатационных свойств. Уточнения включают конкретизацию методов для землеройных ТТМ путем использования обоснованных в работе перечней значимых показателей, распределения их по кластерам и рассчитанных по уточненным зависимостям коэффициентов весомости. Расчетные зависимости, использованные для реализации этих методов, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные зависимости для оценки ТУ машин различными методами

Этапы расчета	Расчетные зависимости
Методика 1. Матричный метод	
1. Экспертное определение количества n значимых показателей эксплуатационных свойств и их номенклатуры; выбор m однотипных машин для сравнения	$n, m \in N$

Продолжение табл. 3

Этапы расчета	Расчетные зависимости
2. Составление матрицы значений выбранных параметров q_{ij} , где i – номер показателя; j – номер образца	$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1j} & \dots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2j} & \dots & q_{2m} \\ \vdots & & & & & \\ q_{i1} & q_{i2} & \dots & q_{ij} & \dots & q_{im} \\ \vdots & & & & & \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{nj} & \dots & q_{nm} \end{pmatrix}$
3. Приведение показателя свойств q_i каждого j -го образца к безразмерному (нормированному) виду, Q_{ij}	Увеличение значения показателя: – улучшает качество образца $Q_{ij} = \frac{q_{ij}}{q_{i\max}}$ – ухудшает качество образца $Q_{ij} = \frac{q_{i\min}}{q_{ij}}$
4. Определение обобщенной интегральной оценки образцов, Q_j	$Q_j = \sum_1^n Q_{ij}$
5. Назначение ранга образца, R_j , от 1 (лучший образец) до m (худший образец)	$Q_j = \max \Rightarrow R_j = 1$ $Q_j = \min \Rightarrow R_j = m$ $R_j = 1 - \text{лучший образец}$
Методика 2. Метод прямого ранжирования	
1. Выполнить п.1 Методики 1	
2. Экспертное ранжирование показателей свойств, присвоение им баллов весомости; i – номер свойства; R_i – ранг i -го свойства; x_i – балл весомости i -го свойства; n – количество свойств	$1 \leq R \leq n$ $R_i = 1 \Rightarrow x_i = n$ $R_i = n \Rightarrow x_i = 1$
3. Сумма ранговых баллов каждого i -го свойства по всем экспертам; K – количество экспертов	$\sum_1^K x_i = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iK}$
4. Определение среднего значения балла i -го свойства, \bar{X}_i	$\bar{X}_i = \frac{\sum_1^K x_i}{K}$

Продолжение табл. 3

Этапы расчета	Расчетные зависимости
5. Определение среднего квадратического отклонения по i -му свойству, S_i	$S_i = \sqrt{\frac{\sum_1^K (x_i - \bar{X}_i)^2}{K-1}}$
6. Определение расчетного ранга i -го свойства, R'_i	<p>при $\bar{X}_i > \bar{X}_{i+1} \Rightarrow R'_i > R'_{i+1}$ при $\bar{X}_i = \bar{X}_{i+1}$: $S_i < S_{i+1} \Rightarrow R'_i > R'_{i+1}$ $S_i > S_{i+1} \Rightarrow R'_i < R'_{i+1}$</p>
7. Определение коэффициента весомости i -го свойства, p_i	$p_i = \frac{\sum_1^K x_i}{\sum_1^n \sum_1^K x_i}$
8. Оценка правильности составления матрицы средних значений, \bar{X}_i	$0,5n \cdot (n+1) = \sum_1^n \bar{X}_i$
9. Оценка согласованности мнений экспертов по коэффициенту конкордации W	$W = \frac{12d^2}{K^2(n^3 - n)}$ $d = \sum_1^K x_i - \frac{\sum_1^n \sum_1^K x_i}{n}$
10. Вывод о согласованности мнений экспертов	<p>$W > 0,7$ – высокая $0,3 \leq W \leq 0,7$ – средняя $W < 0,3$ – низкая</p>
11. Расчет показателя ТУ образца, $\Pi_{\text{ТУ}}$; q_i – значение показателя i -го свойства; p_i – коэффициент его весомости	$\Pi_{\text{ТУ}} = \sum_1^n q_i p_i$ <p>$\Pi_{\text{ТУ max}}$ – лучший образец</p>
Методика 3. Метод кластерного ранжирования	
1. Выполнить п.1 Методики 1	
2. Экспертное распределение единичных показателей свойств по кластерам; n_{ki} – количество показателей в кластере; N_j – количество кластеров	<p>Рекомендуемые кластеры: показатели функциональности; показатели маршевой подвижности; показатели маневровой подвижности</p>

Окончание табл. 3

Этапы расчета	Расчетные зависимости
3. Определение коэффициента весомости комплексных показателей (кластеров) P_k и единичных показателей внутри кластеров P_e	По п.п. 2...10 Методики 2
4. Расчет комплексных показателей, Q_j ; q_{ij} – значение i -го показателя в j -том кластере; P_{eij} – коэффициент весомости i -го показателя в j -ом кластере	$Q_j = \sum_1^{n_k} q_{ij} P_{eij}$
5. Расчет обобщенного показателя технического уровня образца, $\Pi_{\text{ТУ}}$	$\Pi_{\text{ТУ}} = \sum_1^N Q_j P_k$ $\Pi_{\text{ТУ max}}$ – лучший образец

Оценка информативности и состоятельности исследуемых методов проанализирована по результатам расчетов на примере землеройных машин. В качестве объектов расчета были выбраны восемь образцов одиночных автосамосвалов отечественного и зарубежного производства грузоподъемностью 18–20 тонн. Результаты расчетов тремя различными методами и сравнительной оценки их информативности приведены в таблице 4. Анализ полученных данных показывает полную схожесть результатов по выявлению лидирующего образца. Распределение рангов (приоритетов) остальных образцов разнится в зависимости от принятого метода сравнения. Наибольшее совпадение рангов дают методы, учитывающие значимости каждого из показателей (прямое и кластерное ранжирование).

Все рассмотренные методы дают значимое различие показателей ТУ лидирующего и наиболее отстающего образца (до 21–23%), что представляется достаточно информативным для выбраковки из рассмотрения отстающих моделей. Вместе с тем, крайне незначительная разность обобщенных оценок лидирующих образцов (не более 5–6,5%) не дает оснований к безусловной однозначности в установлении приоритета в выборе модели из их числа. Полученные результаты дают основание считать, что традиционные методы оценки ТУ землеройных машин при определении приоритета в их выборе целесообразно применять лишь для первичного отсева отстающих образцов.

Таблица 4 – Результаты сравнительной оценки информативности традиционных методов определения технического уровня автосамосвалов

Показатели	Модели самосвалов грузоподъемностью 18 – 20 тонн							
	КАМАЗ 6540	Урал 6370	КАМАЗ 65222	КАМАЗ 6520	МАЗ 65012 8-8520- 000	САМС HN3250 P34C6 M3	Dongfeng DFL 3251A- A1-375	Mercedes- Benz Actros 3336K
Прямое ранжирование								
Показатель ТУ	9,71	10,79	11,24	11,79	12,54	11,73	11,23	11,67
Ранг показателя (1 – max; 8 – min)	8	7	6	2	1	3	5	4
% от показателя лидера	77,45	86,08	89,68	94,01	100,0	93,56	89,53	93,04
Разница с показателем лидера, %	22,55	13,92	10,32	5,99	0,00	6,44	10,47	6,96
Кластерный метод								
Показатель ТУ	11,56	12,52	13	13,81	14,55	13,66	13,21	13,74
Ранг показателя (1 – max; 8 – min)	8	7	6	2	1	4	5	3
% от показателя лидера	79,45	86,05	89,35	94,91	100,0	93,88	90,79	94,43
Разница с показателем лидера, %	20,55	13,95	10,65	5,09	0,00	6,12	9,21	5,57
Матричный метод								
Показатель ТУ	7,174	7,608	7,712	7,503	8,063	7,879	7,767	8,025
Ранг показателя (1 – max; 8 – min)	8	6	5	7	1	3	4	2
% от показателя лидера	88,97	94,36	95,65	93,05	100,0	97,72	96,33	99,53
Разница с показателем лидера, %	11,03	5,64	4,35	6,95	0,00	2,28	3,67	0,47

Кроме того, результаты расчетов ТУ традиционным матричным методом удобно использовать для выявления сильных и слабых сторон сравниваемых машин путем построения сравнительных лепестковых диаграмм уровней показателей их эксплуатационных свойств. Например, сравнение автосамосвала КАМАЗ-6540 было проведено со всеми лидирующими зарубежными аналогами из Европы, Китая и Белоруссии с нанесением их лепестковых диаграмм ТУ на один график (рис. 5).



Рис. 5. Лепестковые диаграммы технического уровня КАМАЗ-6540 и лидирующих зарубежных аналогов

Анализ диаграмм показывает значительное отставание КАМАЗ-6540 по показателям функциональности (объем кузова), энерговооруженности (удельная мощность двигателя), подвижности и экономичности (число передач в трансмиссии) не только от европейского образца, но и от китайских и белорусских машин, на что необходимо обратить внимание как потребителям при выборе машин, так и разработчикам при определении направлений усовершенствования отечественных моделей.

Метод сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин с использованием многокритериальной оптимизационной математической модели

Результаты оценки информативности традиционных методов определения ТУ показали, что полагаться на опыт экспертов в выборе приоритетов

машин недостаточно, требуется применение других научных подходов, основанных на решении многокритериальных задач. Для этого необходим специализированный аналитический аппарат, в качестве которого предложен метод доминирования критериев.

При рассмотрении количества образцов m с числом n показателей значимых эксплуатационных свойств, каждый из которых имеет значение q , распределение коэффициентов относительной важности этих показателей эффективности p_j подчиняется ограничению:

$$0 \leq p_j \leq 1; \quad j = \overline{1, n}; \quad \sum_{j=1}^n p_j = 1. \quad (1)$$

При этом совокупность всех возможных вариантов приоритетов среди этих коэффициентов должна быть сформирована в виде последовательностей, обеспечивающих выполнение условий вида:

$$p_1 \geq p_2 \geq p_3 \geq \dots p_j \dots \geq p_{n-1} \geq p_n. \quad (2)$$

Количество возможных вариантов выражений вида (2) равно $n!$.

Алгоритм получения оптимального значения эффективности сравниваемых образцов D_i по каждому варианту решения:

- значения p_j упорядочиваются в виде последовательностей (2);
- значения q_{ij} приводятся к безразмерному виду $q_{ij_{np}}$ с учетом целополазания по правилу п.3 табл. 3 с последующим их нормированием

$$q_{ij_{np}} = \frac{q_{ij_{np}}}{\sum_1^m q_{ij_{np}}}; \quad (3)$$

– для каждого из сравниваемых вариантов $i = \overline{1, m}$ решается задача векторной оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} p_j \rightarrow \max \\ \sum_{j=1}^n p_j = 1, \quad 0 \leq p_j \leq 1, \quad j = \overline{1, n} \end{array} \right. \quad (4)$$

Значение p_j аналитически определяется как:

$$p_j = \begin{cases} \frac{1}{k} & , \text{ если } j \leq k \\ 0 & , \text{ если } j > k \end{cases}, \quad (5)$$

где величина индекса k определяется по условию

$$k = \max_j q_{ij}. \quad (6)$$

Матрица эффективностей объектов оценки для различных моделей сравниваемых машин для каждого из $n!$ вариантов приоритета p_j имеет вид

$$D_i = \begin{pmatrix} p_{11} \cdot q_{11=} & p_{12} \cdot q_{12=} & \dots & p_{1j} \cdot q_{1j=} & \dots & p_{1n} \cdot q_{1n=} \\ p_{21} \cdot q_{21=} & p_{22} \cdot q_{22=} & \dots & p_{2j} \cdot q_{2j=} & \dots & p_{2n} \cdot q_{2n=} \\ \vdots & & & & & \\ p_{m1} \cdot q_{m1=} & p_{m2} \cdot q_{m2=} & \dots & p_{ij} \cdot q_{ij=} & \dots & p_{mn} \cdot q_{mn=} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где m – число сравниваемых машин, n – число учитываемых показателей, p_{ij} – эффективность j -го показателя i -го образца для $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Если обозначить число вариантов приоритетов $n! = \xi$ матрица приоритетов по всем ξ вариантам, $\xi = \overline{1, n!}$ для m сравниваемых машин примет вид

$$D_{\xi i} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1i} & \dots & D_{1m} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2i} & \dots & D_{2m} \\ \vdots & & & & & \\ D_{\xi 1} & D_{\xi 2} & \dots & D_{\xi i} & \dots & D_{\xi m} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Из матрицы (8) по каждой строке выбираем образец с $D_{\xi i} = \max$. Максимальное количество приоритетов одной модели определяет показатель технического уровня лучшего образца.

Алгоритм реализации метода приведен на рис.6.

Разработанная модель позволяют производить решение многокритериальных задач с большим количеством показателей. При рассмотрении 9 показателей эксплуатационных свойств ($n = 9$), обоснованных в ходе экспертных исследований, общая совокупность распределений вероятностей, с соответствующими им коэффициентами относительной важности показателей, составляет $9! = 362880$ вариантов. Проведение такого объема вычислений потребовало применения специального программного обеспечения для ЭВМ, которое было разработано и получило свидетельство о государственной регистрации.

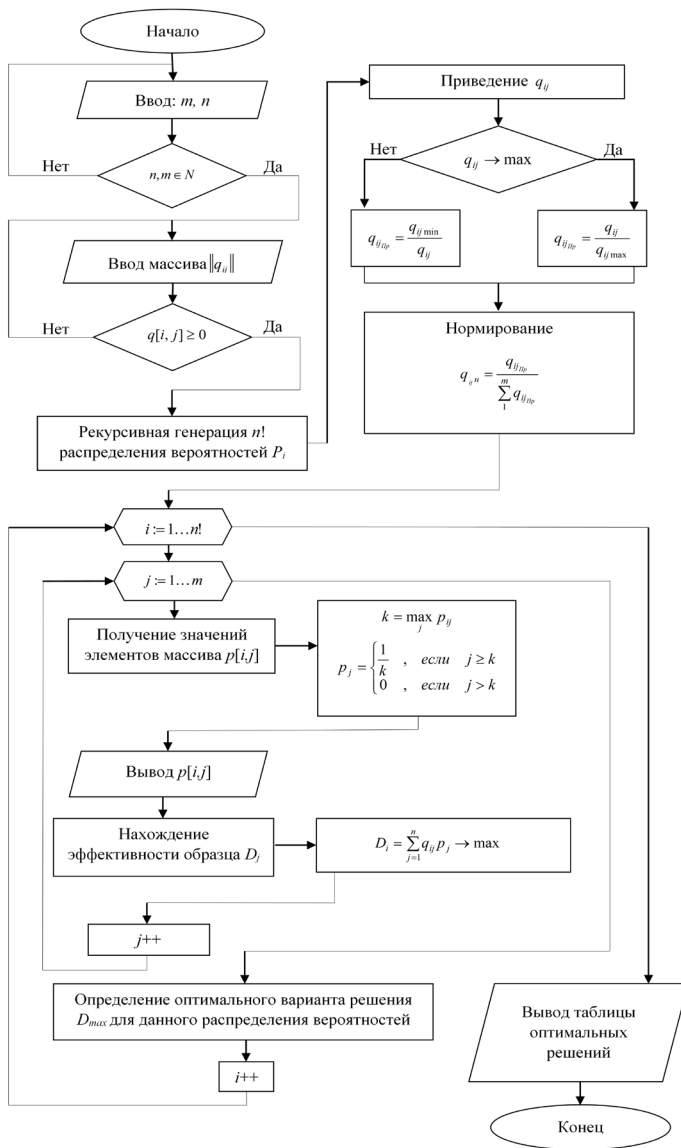
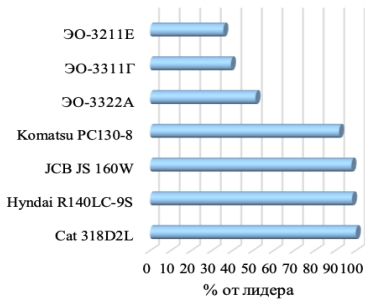


Рис. 6. Алгоритм реализации метода многокритериальной оптимизации выбора машин при их сравнительной оценке

Результаты апробации разработанного метода путем оценки его информативности в сравнении с традиционными методами при определении технического уровня машин

Информативность метода многокритериальной оптимизации в сравнении с наиболее эффективным традиционным методом кластерного ранжирования оценена на примерах экскаваторов, автосамосвалов, скреперов и бульдозеров. Перечень использованных при этом значимых показателей для каждой машины с их распределением по кластерам и весомостью каждого соответствовали рекомендованным в работе. Результаты сравнительной оценки представлены на рис. 7–10.

а)



б)

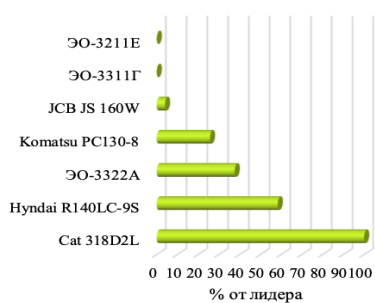
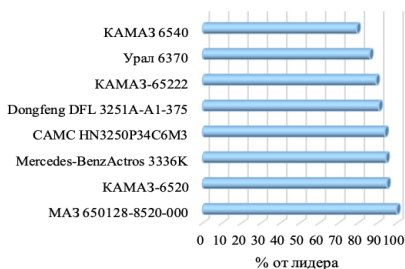


Рис. 7. Соотношение оценок $\Pi_{\text{ТУ}}$ экскаваторов методами:

а) кластерного ранжирования; б) многокритериальной оптимизации

а)



б)

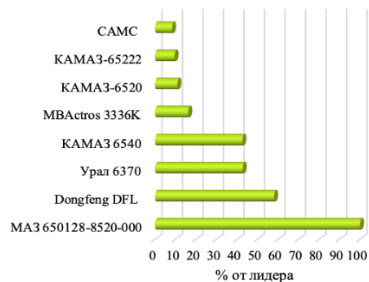


Рис. 8. Соотношение оценок $\Pi_{\text{ТУ}}$ автосамосвалов методами:

а) кластерного ранжирования; б) многокритериальной оптимизации

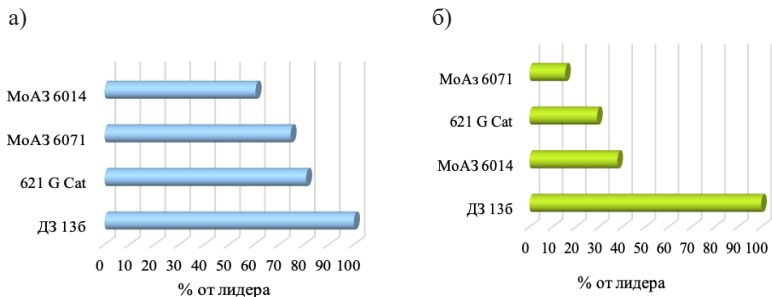


Рис. 9. Соотношение оценок $\Pi_{\text{TУ}}$ скреперов методами: а) кластерного ранжирования; б) многокритериальной оптимизации

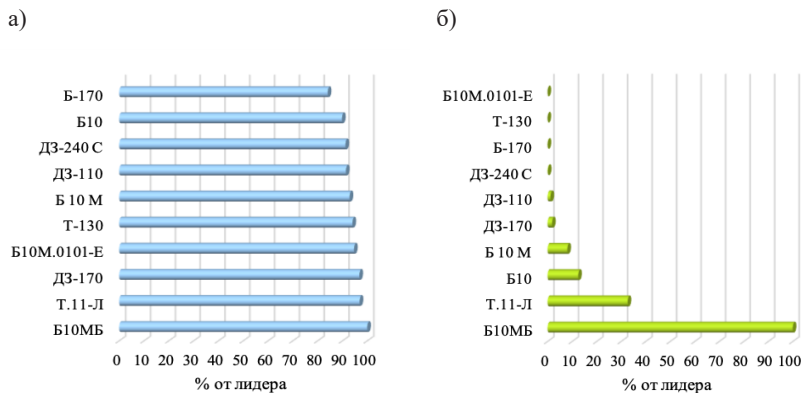


Рис. 10. Соотношение оценок $\Pi_{\text{TУ}}$ бульдозеров методами: а) кластерного ранжирования; б) многокритериальной оптимизации

Сравнение результатов расчетов показывает, что оба использованных метода оценки ТУ отдают лидерство одним и тем же моделям машин, однако при традиционном экспертном методе кластерного ранжирования отставание ближайших образцов от лидеров составляет в большинстве случаев 1,8–5,1%, а при разработанном методе – 41,9–67,3%, что свидетельствует о его более высокой информативности, обеспечивающей однозначность в выборе приоритета среди машин-лидеров.

Выявленные по результатам расчета образцы-лидеры при необходимости подвергаются в дальнейшем сравнительной оценке их конкурентоспособности на основе существующих подходов, в том числе с учетом показателей их надежности.

Оценка экономического эффекта от обоснованного предложенным методом выбора 20-ти седельных тягачей КАМАЗ-5490 взамен первоначально запланированных к приобретению автотягачей Scania при обновлении в 2021 г. парка машин на автотранспортном предприятии ООО «Миларин» показала, что при увеличении годовых расходов на эксплуатацию отечественных автомобилей на 1,54 млн руб. снижение затрат на их приобретение составило 106 млн. руб. при сохранении требуемого уровня эксплуатационной производительности парка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современный рынок ТТМ для дорожно-строительной отрасли представлен большим их многообразием. Обеспечение в такой ситуации объективности выбора потребителем для приобретения наиболее эффективного образца из значительного числа однотипных машин требует решения актуальной научной задачи – усовершенствования и разработки методов оценки конкурентоспособности машин, в том числе в части определения их технического уровня, как важного комплексного показателя качества.

2. Анализ существующих традиционных методов оценки технического уровня промышленной продукции показал, что их результаты не всегда обеспечивают получения однозначного заключения, что объясняется субъективизмом подходов, основанных на экспертных оценках.

3. В интересах повышения объективности традиционных методов при оценке ТУ землеройных машин (экскаваторов, бульдозеров, скреперов и строительных автосамосвалов) в работе было проведено их усовершенствование путем обоснования минимально достаточного перечня значимых показателей эксплуатационных свойств, распределения свойств в кластеры по принципу формирования целевых комплексных показателей, обоснования коэффициентов весомости единичных и комплексных показателей свойств.

4. Оценка состоятельности усовершенствованных методов (матричный метод, прямое и кластерное экспертное ранжирование показателей свойств) в отношении сравнительной оценки ТУ землеройных ТТМ показала, что все исследованные методы дают полную схожесть результатов по выявлению лидирующих образцов, однако значимое различие показателей ТУ проявляется лишь между лидирующим и наиболее отстающим образцами (до 21–23%), что представляется достаточно информативным, но сами методы целесообразно использовать только для предварительного выявления и выбраковки из рассмотрения существенно отстающих моделей.

5. Высокая схожесть значений показателей эксплуатационных свойств современных ТТМ в рамках одной классификационной группы приводит

к крайне незначительным различиям в численных значениях показателей ТУ лидирующих образцов (не более 5–6%). Столь низкая информативность традиционных методов не дает оснований к безусловной однозначности при окончательном установлении приоритетов в выборе машины.

6. В результате исследования установлена возможность использования уточненного матричного метода для определения конструктивных направлений повышения ТУ машин, основанного на проведении вертикального и горизонтального матричного анализа показателей эксплуатационных свойств сравниваемых образцов с представлением результатов в виде лепестковых диаграмм.

7. Результаты оценки состоятельности традиционных методов показали, что для принятия решения о приоритете образца в условиях неопределенности в выборе значимых показателей, недостаточной информативности существующих методов, необходимости учета перечня показателей, обладающих высокой схожестью, полагаться на опыт экспертов недостаточно. Для решения таких задач целесообразно использовать многокритериальные оптимизационные математические модели.

8. В рамках диссертационного исследования разработан метод сравнительной оценки ТУ транспортно-технологических машин с использованием многокритериальной оптимизационной математической модели, базирующийся на методе доминирования критериев и позволяющий безэкспертно определять лидерство при выборе образцов путем полного перебора всех возможных вариантов приоритетов показателей значимых эксплуатационных свойств при различных целеполаганиях их влияния на показатель ТУ. Разработаны математическая модель и компьютерная программа реализации метода. Его применение обеспечивает существенно более значимую разницу показателей ТУ лидирующих образцов в группе сравниваемых машин, которая достигает 42–67 % и является убедительным аргументом в пользу выбора лидера.

9. Техничко-экономическая оценка эффективности выбора образцов с использованием метода многокритериальной сравнительной оценки их ТУ, подтвердила его практическую работоспособность в выявлении наиболее конкурентоспособной модели.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. Мейке, У.Н. Концептуальная оценка возможности создания отечественного сочлененного автосамосвала для использования по всем видам дорог и местности / У.Н. Мейке, В.Н. Добромиров, И.В. Арифуллин, К.И. Фомин // Вестник

Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 2 (65). – С. 18–25.

2. Мейке, У.Н. Обоснование рациональных компоновочных схем автосамосвалов для дорожно-строительной отрасли / У.Н. Мейке, В.Н. Добромиров, И.В. Арифуллин, К.И. Фомин, Е.Р. Лукашук // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 4 (67). – С. 48–55.

3. Мейке, У.Н. Исследование состоятельности методов оценки технического уровня строительных автосамосвалов / У.Н. Мейке // Технический журнал «Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника». – 2022. – № 6. – С. 13–22.

4. Мейке, У.Н. Исследование возможности применения метода районирования для выбора дорожно-строительных машин / У.Н. Мейке, А.В. Терентьев, В.Н. Добромиров // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 26–31.

5. Мейке, У.Н. Обоснование показателей эксплуатационных свойств автосамосвалов, значимых для экспресс-оценки их технического уровня потребителем / У.Н. Мейке // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 8. – С. 23–28.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

6. Meike, U. A method for the comparative assessment of the technical quality of dump trucks with different structures (Методика сравнительной оценки технического уровня самосвалов различных компоновочных схем) / U. Meike, V. Dobromirov, E. Lukashuk // Architecture and Engineering, Volume 5 Issue 3, 2020, pp. 49–55. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-3-49-55.

7. Meike, U. Development concept of a domestically-produced articulated dump truck for the development of the Arctic territories of Russia (Концепция создания отечественного шарнирно-сочлененного автосамосвала для освоения арктических территорий Российской Федерации) / U. Meike, K. Fomin, V. Dobromirov // Transportation Research Procedia, Volume 57, 2021, pp. 184–191. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.041

Программы для ЭВМ, имеющие государственную регистрацию

8. Мейке, У.Н. Программа для сравнительной оценки технического уровня дорожно-строительных машин: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662783, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07.07.2022 / У.Н. Мейке, В.Н. Добромиров.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 07.04.2023. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 52.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.