

УДК 004.021:69.052  
DOI 10.17513/snt.39929

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Цесарь А.А.

*ООО «Топкон Позиционинг Системс», Москва, e-mail: 4drv@mail.ru*

Рассмотрены основные методы, используемые для принятия решений при планировании ремонта дорожного покрытия. С целью интегральной оценки транспортно-эксплуатационного состояния дорожного покрытия используются различные индексы, на основании которых принимаются решения о проведении ремонтных работ. Рассмотрены модели вычисления наиболее распространенных индексов: состояния дорожного покрытия и остаточного срока службы дорожного покрытия, которые являются основой для планирования ремонта дорожного покрытия, поскольку эти показатели отражают как точность оценки степени различных разрушений, так и темпов ухудшения состояния дорожного покрытия. Приведена общая последовательность планирования ремонта дорожного покрытия и описана методика автоматизации планирования ремонта. В статье предложен алгоритм планирования ремонта объектов улично-дорожной сети, реализующий данную методику, в котором предусмотрены три режима планирования: по категоричности, по значению интегрального коэффициента ремонта и смешанный режим. Приведен фрагмент результатов расчета индекса состояния дорожного покрытия для объектов улично-дорожной сети г. Москвы. Сделан вывод о том, что полученные значения индекса позволяют судить о степени разрушения дорожного полотна и отнести объекты к одному из трех подмножеств: «без ремонта», «текущий ремонт» и «капитальный ремонт».

**Ключевые слова:** автоматизация, дорожное покрытие, индекс состояния покрытия, остаточный срок службы, ремонт, алгоритм

## ALGORITHM FOR AUTOMATION PLANNING ROAD REPAIRS

Tsesar A.A.

*Topcon Positioning Systems, Moscow, e-mail: 4drv@mail.ru*

The main methods used for decision-making when planning road repairs are considered. For the purpose of an integral assessment of the transport and operational condition of the road surface, various indices are used, on the basis of which decisions are made on carrying out repair work. Models for calculating the most common indices are considered: the condition of the road pavement condition index and the residual service life of the road surface, which are the basis for planning the repair of the road surface, since these indicators reflect both the accuracy of assessing the degree of various damages and the rate of deterioration of the condition of the road surface. The general sequence of planning for road surface repair is given and a technique for automating repair planning is described. The article proposes an algorithm for planning the repair of street-road network objects that implements this technique, which provides three planning modes: by category, by the value of the integral repair coefficient and a mixed mode. A fragment of the results of calculating the pavement condition index for objects of the Moscow street-road network is presented. It is concluded that the obtained condition values make it possible to judge the degree of destruction of the roadway and classify objects into one of three subsets: "without repair", "routine repair" and "major repair".

**Keywords:** automation, road surface, pavement condition index, remaining service life, repair, algorithm

Управление качеством дорожного покрытия на этапе его эксплуатации заключается в регулярном мониторинге его состояния и принятии решений по проведению ремонта на объектах улично-дорожной сети (УДС), при рациональном распределении имеющихся ресурсов (финансовых, материальных, технических, людских) с целью продления срока службы дорожного полотна [1].

Для автоматизации процессов управления качеством дорожного покрытия на этапе его эксплуатации разработаны и используются различные системы управления дорожным покрытием (СУДП), решающие задачи анализа состояния покрытия, прогнозирования его поведения во времени, планирования ремонтно-восстановитель-

ных работ, наиболее эффективное распределение ограниченных ресурсов [2–4]. Для успешного решения задач принятия решений в СУДП должны присутствовать аналитические средства, математические модели и методы оптимизации.

При отсутствии СУДП решения принимаются на основании инженерного опыта и экспертных знаний, позволяющих определить некоторые пороговые значения, при достижении которых тот или иной объект нуждается в ремонте. Однако такой подход не позволяет в полной мере учесть все множество факторов, оказывающих влияние на состояние дорожного покрытия, и достаточно точно оценить поведение покрытия с течением продолжительного времени. Методы ранжирования упорядо-

чивают объекты по выбранному критерию (затраты, экономический эффект, стоимость жизненного цикла) для включения их в план ремонтных работ, но при большом количестве объектов и возможных альтернатив их использование весьма затруднено. Математическое программирование позволяет получить правильное решение для планирования ремонтных работ, учитывая долгосрочную перспективу и ограниченность ресурсов, их использование позволяет решать задачи по оптимизации ремонта дорожного покрытия. Однако их вычислительная эффективность падает при увеличении размерности УДС.

Прогресс в области информационных технологий, технических средств и систем искусственного интеллекта заставляют СУДП развиваться в направлении интеллектуализации мониторинга дорожного покрытия [5]. В частности, встроенные интеллектуальные технологии позволяют в полной мере наблюдать за состоянием производства, машин и материалов, предоставляя информацию в режиме реального времени для принятия решений [6, 7]. Достижения в области искусственного интеллекта сделали возможным использование систем поддержки принятия решений, в базах знаний которых аккумулируется экспертный опыт [8].

Цель исследования состоит в разработке методики и алгоритма автоматизации процесса планирования технического обслуживания и ремонта дорожного покрытия, позволяющего повысить технологическую эффективность работ и оптимизировать затраты при выполнении ремонтных мероприятий.

#### Материалы и методы исследования

Методы принятия решений при планировании ремонта дорожного покрытия можно классифицировать по трем группам: исследование операций, эвристические и интеллектуальные. Все эти методы имеют свои достоинства и недостатки. Методы исследования операций используют методы статистического и математического моделирования для поиска оптимальных решений по восстановлению транспортно-эксплуатационного состояния дорожного покрытия [9]. Эвристические методы обеспечивают снижение размерности решаемых задач оптимизации за счет введения различных эвристических правил и поиска субоптимальных решений. Интеллектуальные методы моделируют процессы мышления человека, используя технологии нейронных сетей с возможностью подключения методов исследования операций и эвристических алгоритмов.

С целью интегральной оценки транспортно-эксплуатационного состояния дорожного покрытия используются различные индексы, на основании которых принимаются решения о проведении ремонтных работ. Наиболее распространенными следует считать международный индекс ровности (ИР) – international roughness index (IRI), индекс состояния дорожного покрытия (ИСДП) – pavement condition index (PCI) и индекс остаточного срока службы дорожного покрытия (ИОССДП, remaining service life RSL) и др. [10].

Среди всего многообразия моделей вычисления индекса ИСДП на первый план выдвигаются модели, основанные на использовании других показателей, например [11]:

$$\log(\text{ИСДП}) = 2 - 0.436 \times \log(\text{ИР})$$

Или на основании индексов, характеризующих количество дефектов, обнаруженных в ходе диагностики дорожного полотна:

$$\text{ИСДП} = \alpha_1 \times \text{ИП} + \alpha_2 \times \text{ИПр} + \alpha_3 \times \text{ИТр} + \alpha_4 \times \text{ИРК},$$

где ИП =  $1100 - (K / 20) \times 100$  – индекс поперечной ровности (допустимое значение 20 мм/м);

ИПр =  $((\text{ИР} - 4,22) / (0,5 - 4,22)) \times 100$  – индекс продольной ровности (допустимое значение 4,22 мм/м);

ИТр =  $100 - (\text{ПТ}\% / 3\%) \times 100$  – индекс плотности трещин (допустимое значение 3 %);

ИРК =  $100 - (\text{ПРК}\% / 6,44\%) \times 100$  – индекс плотности ремонтных карт (допустимое значение 6,44 %);

$\alpha_i$  – весовые коэффициенты, определяемые экспертами,

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, 4, \quad \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1.$$

Именно эта модель реализована в предлагаемом алгоритме.

Остаточный срок службы дорожного покрытия (ОССДП) – это время, в течение которого дорожное полотно достигнет неприемлемого состояния и будет нуждаться в ремонте. Определение ОССДП является основой для планирования ремонтно-восстановительных работ на объектах УДС, поскольку этот показатель отражает как точность оценки степени различных разрушений, так и темпов ухудшения состояния дорожного покрытия. Однако отсутствие адекватных моделей оценки текущего состояния дорожного покрытия затрудняет получение точных значений ОССДП.

Существует большое количество работ по определению ОССДП с использованием

детерминированных моделей, которые отличаются критериями, рассматриваемыми параметрами и используемыми исходными данными. Наиболее известной детерминированной моделью для определения ОССДП является модель, предложенная [12], основанная на определении числа повторений нагрузки на полотно, при котором не возникают трещины и не образуется колея.

В разработанном алгоритме используется модель, предложенная в работе [13], которая в качестве основного показателя использует индекс ИР и текущий возраст дорожного покрытия (ТВ):

$$ОССДП = \ln\left(\frac{ИР}{a}\right) / b - ТВ,$$

где  $a$  – значение ИР в начальный период эксплуатации покрытия,  $b$  – кривизна линии ИР.

Разработанная модель может быть эффективно использована для определения уровня ремонта, необходимого для каждого участка дорожного покрытия. Если ОССДП превышает 10 лет, то применение каких-либо ремонтных мероприятий для продления срока службы является неоправданным. В тех случаях, когда ОССДП составляет менее 10 лет, рассматривается вопрос о применении подходящего ремонта для продления срока службы. Участки с ОССДП менее 5 лет также требуют полной или частичной реконструкции.

### Результаты исследования и их обсуждение

Процесс планирования ремонта дорожного покрытия имеет строго определенную

последовательность (рис. 1) и может быть описан в виде универсальной методики.

На первом шаге производится диагностика УДС передвижной дорожной лабораторией, информация заносится в базу данных, по результатам ее анализа устанавливается соответствие имеющимся квалификационным нормам. В автоматизированный банк дорожных данных заносится информация о результатах диагностики УДС, достоверные погодные данные и точные данные об интенсивностях дорожного движения и дорожно-транспортных происшествиях, а также информация о проведенных ремонтных мероприятиях. Производится очистка и подготовка данных для последующего анализа и обработки. Данные фильтруются, сортируются, нормируются и преобразуются к виду, удобному для последующей обработки.

На втором этапе силами специалистов отдела мониторинга выполняется визуальный осмотр дефектов с их фотофиксацией, отбор и испытание кернов, взятых из дорожного полотна. По результатам испытаний составляются акты о соответствии качества полотна и уложенной асфальтобетонной смеси нормативным требованиям и выставляется общая оценка в баллах каждому участку УДС.

На третьем этапе осуществляется составление дефектной ведомости. Отчет по результатам диагностики содержит объективную и точную информацию о текущем состоянии объектов УДС и является основой для принятия решений по формированию титульного списка.



Рис. 1. Общая последовательность планирования РВР

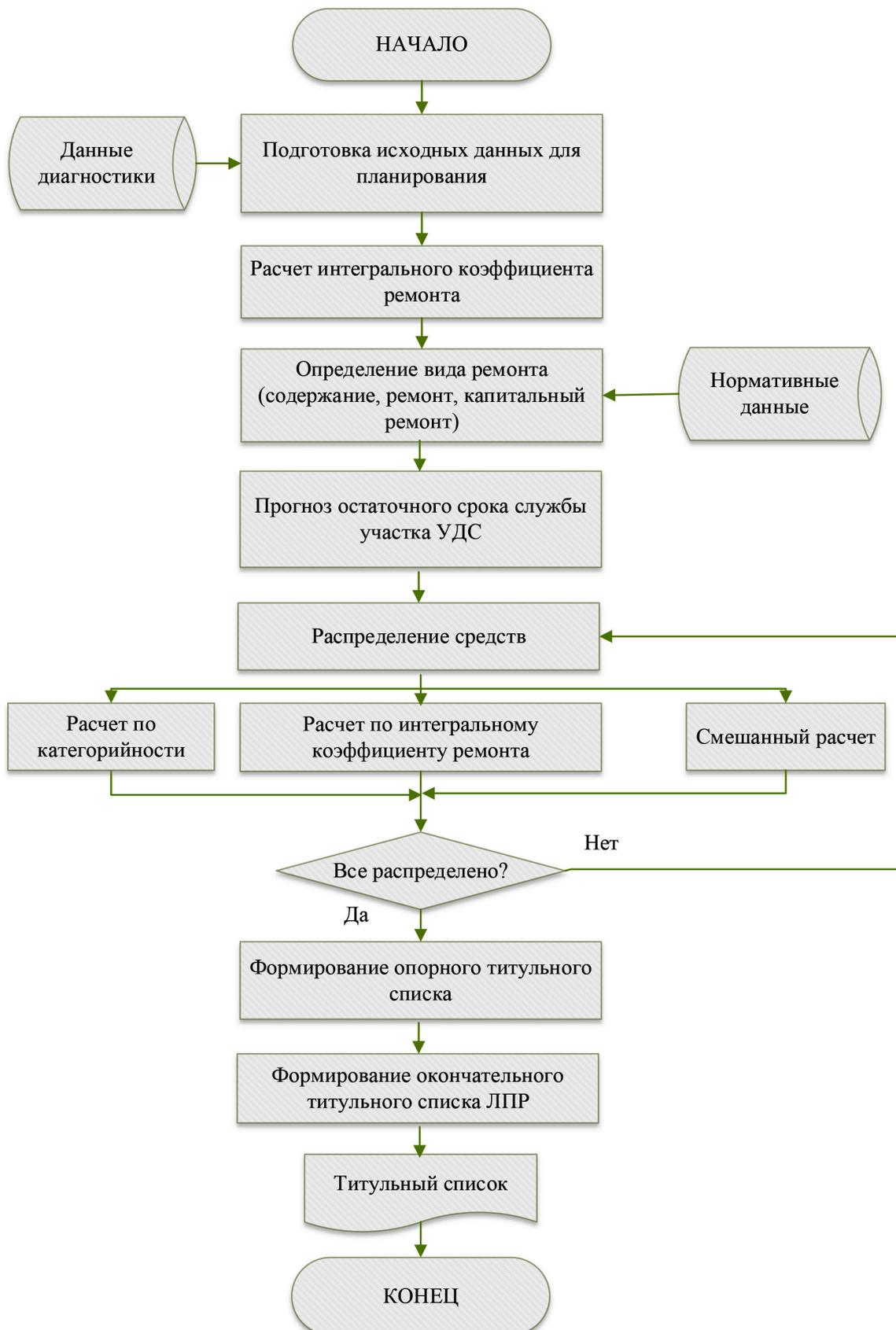


Рис. 2. Схема алгоритма планирования PBP

Четвертый этап заключается в анализе требований к  $i$ -му объекту УДС с использованием нормативной базы. В качестве требований рассматривается обеспечиваемая расчетная скорость движения транспорта, пропускная способность дороги, безопасность движения, способность пропускать автопоезда с разрешенной массой и нагрузкой на ось. Именно их несоблюдение приводит к необходимости ремонта.

На пятом этапе определяется тип ремонтно-восстановительных работ: содержание, ремонт, капитальный ремонт. Выполняется расчет годового объема ремонтно-восстановительных работ по ремонту участка УДС с использованием разработанного алгоритма.

На шестом этапе производится окончательный выбор видов и объемов работ в зависимости от выделенных финансовых ресурсов. В случае ограниченного объема финансирования производится его уточнение в сторону увеличения.

Указанные действия шестого этапа повторяются для всех объектов УДС, в результате чего на седьмом этапе формируется опорный титульный список.

Восьмой этап заключается в анализе альтернативных вариантов и выборе лицом, принимающим решение (ЛПР), наилучшего варианта. В ходе планирования ЛПР оценивает характеристики всех альтернативных вариантов, вырабатывает управляющие воздействия и вносит необходимые коррективы в опорный план ремонта.

Предлагается алгоритм планирования ремонтных работ на объектах УДС, реализующий предложенную методику (рис. 2), который автоматизирует выполнение следующих действий:

1. Сбор исходных данных: результаты мониторинга, интенсивности движения, предыдущие ремонты, результаты анализа кернов.

2. Обработка исходных данных: очистка, восстановление, нормировка...

3. Расчет интегральных показателей мониторинга: площади трещин, выбоин, ремонтных карт, продольной и поперечной ровности – расчет интегрального коэффициента ремонта.

4. Сравнение полученных значений с нормативными показателями и оценка необходимости проведения ремонта каждого объекта (участка УДС). Определение вида ремонта (содержание, ремонт, капитальный ремонт).

5. Наложение условий эксплуатации (интенсивностей, предыдущих ремонтов, категории дороги) и прогноз остаточного срока службы.

6. Построение поверхности планирования ремонта: данные мониторинга опреде-

ляют предположительные границы ремонта (зеленая, желтая и красная области).

#### 7. Распределение средств:

Режим «по категоричности» (начиная с первого приоритета (категория дороги) выбираются красные зоны в порядке убывания интенсивности движения. Затем красные зоны по дорогам следующей по приоритету категории. После распределения средств по всем категориям и всем красным зонам производится просмотр желтых зон, до тех пор, пока все средства не будут распределены).

Режим «По значению интегрального коэффициента ремонта» (участки УДС включаются в титульный список по убыванию значений интегрального коэффициента ремонта, начиная с участка с максимальным значением интегрального коэффициента ремонта, до тех пор пока все средства не будут распределены. Полученный опорный титульный список оценивается ЛПР, вносятся коррективы, в случае необходимости учета дополнительных факторов, и формируется окончательный титульный список).

Режим «Смешанный» (начиная с первого приоритета (категория дороги) выбираются красные зоны в порядке убывания интенсивности движения, у которых значения интегрального коэффициента ремонта,  $0 \leq k_p \leq 1$  больше наперед заданного граничного значения. Участки УДС включаются в титульный список по убыванию значений интегрального коэффициента ремонта, начиная с участка с максимальным значением интегрального коэффициента ремонта, до тех пор пока все средства не будут распределены. Полученный опорный титульный список оценивается ЛПР, вносятся коррективы, в случае необходимости учета дополнительных факторов, и формируется окончательный титульный список).

В ходе мониторинга объектов УДС с использованием комплексов многокритериальной оценки эксплуатационного состояния объектов улично-дорожной сети «АДС-МАДИ» собирается информация о продольной и поперечной ровности, плотности трещин и плотности ремонтных карт и вычисляются значения индекса РСІ для каждого участка УДС (таблица).

На основании вычисленных значений индекса РСІ в соответствии с таблицей решений (рис. 3) все объекты УДС разбиваются на три подмножества: «без ремонта», «текущий ремонт» и «капитальный ремонт».

В подмножество «без ремонта» попадают объекты, состояние которых находится в допустимых нормативных эксплуатационных значениях. В подмножество «текущий ремонт» попадают объекты при незначительном повреждении дорожного полотна.

## Фрагмент результатов расчета индекса РСІ

№ п/п	Идентификатор объекта	Наименование объекта	Площадь проезжей части, м <sup>2</sup>	РСІ
1	2	3	4	11
2	315908724	1 квартал микрорайона Капотня (кольцевой проезд с примыканиями)	8692,90	60,66
1	10002045	1 Мая улица	3324,00	61,81
9	10002852	10-й проезд Марьиной Рощи	2145,30	61,28
67	10001374	10-летия Октября ул.	6951,00	81,97
10	10002853	11-й проезд Марьиной Рощи	2985,00	63,68
69	10001505	11-й проспект	7029,90	77,64
70	10003564	11-я улица Текстильщиков	8608,30	82,00
71	10002854	12-й проезд Марьиной Рощи	2364,40	42,14
72	10003420	12-я Новокузьминская улица	5046,10	54,61
11	10002855	13-й проезд Марьиной Рощи	4605,40	43,24
12	10002856	14-й проезд Марьиной Рощи	4330,10	70,22
73	10002857	17-й проезд Марьиной Рощи	3264,50	55,56
74	10000013	1812 г. улица	14894,80	51,55

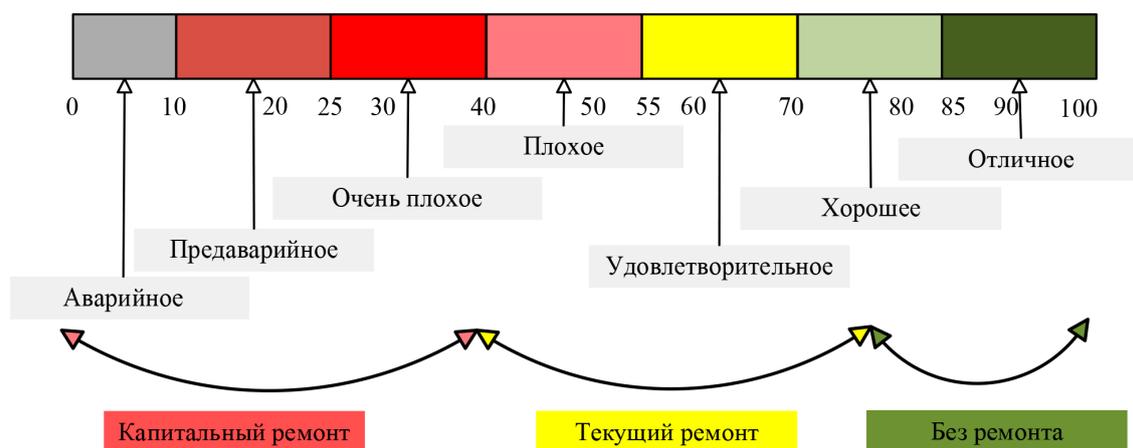


Рис. 3. Разделение объектов УДС на основании индекса РСІ

В подмножество «капитальный ремонт» попадают объекты с предаварийным и аварийным состоянием. Он нацелен на восстановление дорожного покрытия и повышение эксплуатационных характеристик [14]. Капитальный ремонт должен быть выполнен без вариативности в случае аварийного состояния дорожного полотна.

### Заключение

Разработана методика автоматизации планирования ремонтно-восстановительных работ на объектах улично-дорожной сети, состоящая в последовательном выполнении ряда шагов с целью выработки

альтернативных решений по рациональной организации ремонтных мероприятий, их увязки по очередности проведения и по времени.

Разработан алгоритм планирования ремонтных работ на объектах УДС, в котором предусмотрена возможность выбора режима планирования: по категоричности, по значению интегрального коэффициента ремонта (или его предельному значению) и смешанный режим (по категории, а в пределах категории – по достижению граничного значения интегрального коэффициента ремонта). Использование разработанного алгоритма в ходе планирования дорожно-

го ремонта, на основании результатов диагностики позволит повысить технологическую эффективность работ по содержанию и ремонту дорожного полотна, проводить обоснованный выбор материалов для производства работ и оптимизировать затраты при выполнении ремонтных мероприятий.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание системы поддержки принятия решений, которая станет универсальным инструментом, помогающим разрабатывать рациональные планы ремонта, что позволит расширить область применения методов искусственного интеллекта в перспективной области принятия решений, которые касаются ремонта дорожного полотна.

### Список литературы

1. Алексиков С.В., Альшанова М.И. Оценка надежности дорожной сети по состоянию покрытия // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4 (11). С. 92–97.
2. Inti S., Kumar S.A. Sustainable Road design through multi-objective optimization: A case study in Northeast India // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021. Vol. 91. 102594. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102594.
3. Kawther A., Belal Al-H., Maher M. Application of chaos discrete particle swarm optimization algorithm on pavement maintenance scheduling problem // Cluster Computing. 2019. Vol. 22, Is. S2. P. 4647–4657. DOI: 10.1007/s10586-018-2239-3.
4. Слободчикова Н.А., Каташевцев М.Д., Кутенков В.В. Метод прогнозирования состояния дорожных одежд автомобильных дорог капитального типа на основе алгоритма дерева решений // Путевой навигатор. 2023. № 57 (83). С. 36–43.
5. Chen W., Zheng M. Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions // Automation in Construction. 2021. Vol. 130. 103840. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103840.
6. Tohidi M., Khayat N., Telvari A. The use of intelligent search algorithms in the cost optimization of road pavement thickness design // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13, Is. 3. 101596. DOI: 10.1016/j.asej.2021.09.023.
7. Yang X., Guan J., Ding L., You Z., Lee V.C.S., Hasan M.R.M., Cheng X. Research and applications of artificial neural network in pavement engineering: A state-of-the-art review // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2021. Vol. 8, Is. 6. P. 1000–1021. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.03.005.
8. Marcelino P., Antunes M.L., Fortunato E., Gomes M.C. Machine learning approach for pavement performance prediction // International Journal of Pavement Engineering. 2021. Vol. 22, Is. 3. P. 341–354. DOI: 10.1080/10298436.2019.1609673.
9. Печников А.А., Абрамов У.В. Планирование ремонта участка дороги как задача разбиения множеств // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1. С. 104–108.
10. Han C., Ma T., Chena C. Asphalt pavement maintenance plans intelligent decision model based on reinforcement learning algorithm // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 299. 124278. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124278.
11. Park K., Thomas N.E., Lee K.L. Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition // I. J. Transp. Eng. 2007. Vol. 133, Is. 12. P. 706–709. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:12(706).
12. Karballaezadeh N., Zaremotekhas F., Shamshirband S., Mosavi A., Nabipour N., Csiba P., Várkonyi-Kóczy A.R. Intelligent Road Inspection with Advanced Machine Learning; Hybrid Prediction Models for Smart Mobility and Transportation Maintenance Systems. Energies. 2020, Vol. 13, Is. 7. P. 1718. DOI: 10.3390/en13071718.
13. Turki I.A.S., Adnan M.S.S. Prediction of pavement remaining service life using roughness data – Case study in Dubai // International Journal of Pavement Engineering. 2003. Vol. 4, Is. 2. P. 121–129. DOI: 10.1080/10298430310001634834.
14. Колбасин А.М., Гумеров А.Р. Автоматизация дорожного строительства // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. URL: <https://resources.today/PDF/12INOR120.pdf>. DOI: 10.15862/12INOR120 (дата обращения: 25.01.2024).