

Батракова А.Г., канд. техн. наук, Галащук И.Б.

ПРЕВЕНТИВНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ПОКРЫТИЯ

Аннотация. Выполнен анализ стратегий обслуживания дорожных одежд. На основании анализа обоснованы преимущества стратегии превентивного обслуживания. Приведена постановка задачи оптимизации управления ресурсами в условиях ограниченного финансирования.

Ключевые слова: стратегия обслуживания, превентивное обслуживание, отложенное обслуживание, условия ограниченного финансирования.

Анотація. Виконано аналіз стратегій обслуговування дорожніх одягів. На підставі аналізу обґрунтовано переваги стратегії превентивного обслуговування. Наведено постановку задачі оптимізації управління ресурсами в умовах обмеженого фінансування.

Ключові слова: стратегія обслуговування, превентивне обслуговування, відкладене обслуговування, умови обмеженого фінансування.

Annotation. The analysis of the strategies of maintenance pavements is provided. Based on the analysis advantages of strategy of preventive maintenance is shown. Statement of the problem of optimization with limited resource to pavement management is done.

Key words: maintenance strategy, preventive maintenance, deferred maintenance, limited funding.

Экономия при строительстве, содержании и ремонтах автомобильных дорог может быть достигнута за счет внедрения результатов научных исследований в области ресурсо- и энергосберегающих технологий, повышения работоспособности дорожных одежд и применения современных технологий принятия управленческих решений. Мировой опыт в связи с этим свидетельствует о перспективности разработки и внедрения, так называемых

систем управления дорожным покрытием (Pavement Management System, далее PMS) или систем управления состоянием покрытия (СУСП). Задача разработки таких систем состоит, прежде всего, в:

а) привлечении методов и средств получения надежной и достоверной информации о текущем состоянии дорожных одежд;

б) разработке надежных критериев прогнозирования эволюции состояния дорожной сети на основе апробированных математических моделей (как детерминированных, так и вероятностных) с учетом мирового опыта и специфики условий в Украине;

в) разработке эффективных прикладных алгоритмов, программного обеспечения и практических рекомендаций (адаптированных к конкретным условиям) для оптимизации использования ресурсов, формирования эффективной инвестиционной политики и достижения наилучших результатов в процессе проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

Современная система управления состоянием покрытия (СУСП) или, по зарубежной терминологии – PMS включает в себя модели деградации дорожных одежд с одной стороны и набор методик и алгоритмов принятия решений – с другой. В свою очередь, для выбора и использования наиболее эффективной и адекватной модели, необходимо иметь соответствующий набор данных, как о текущем состоянии покрытия, так и о его предыстории. Успешное применение моделей и алгоритмов может обеспечить существенную экономию средств, расходуемых на обслуживание дорожной сети. Однако проблема осложняется тем, что разрушение дорожных одежд – динамический, сложный и вероятностный процесс. Он является результатом совместного воздействия различных факторов, таких как транспортные нагрузки, климатические условия, конструктивные особенности дорожных одежд, а также некоторых дополнительных факторов.

Поэтому целью статьи является выбор и обоснование стратегии обслуживания в рамках соответствующей модели оценки состояния конструкции, а также постановка задач оптимизации управления ресурсами, выделяемыми на содержание дорог.

Как уже говорилось выше, в случае недостатка средств дорожные организации вынуждены ремонтировать лишь участки (секции) дорог,

находящиеся в состояниях низшего уровня (крайне неудовлетворительное, неудовлетворительное, удовлетворительное). Такую вынужденную стратегию принято называть «отложенным обслуживанием». При этой стратегии неизбежно возникают проблемы, связанные с общим ухудшением состояния сети дорог. Для доказательства этого рассмотрим в качестве примера график изменения со временем одного из возможных обобщенных показателей (*PCI*) участка дороги (рис. 1).

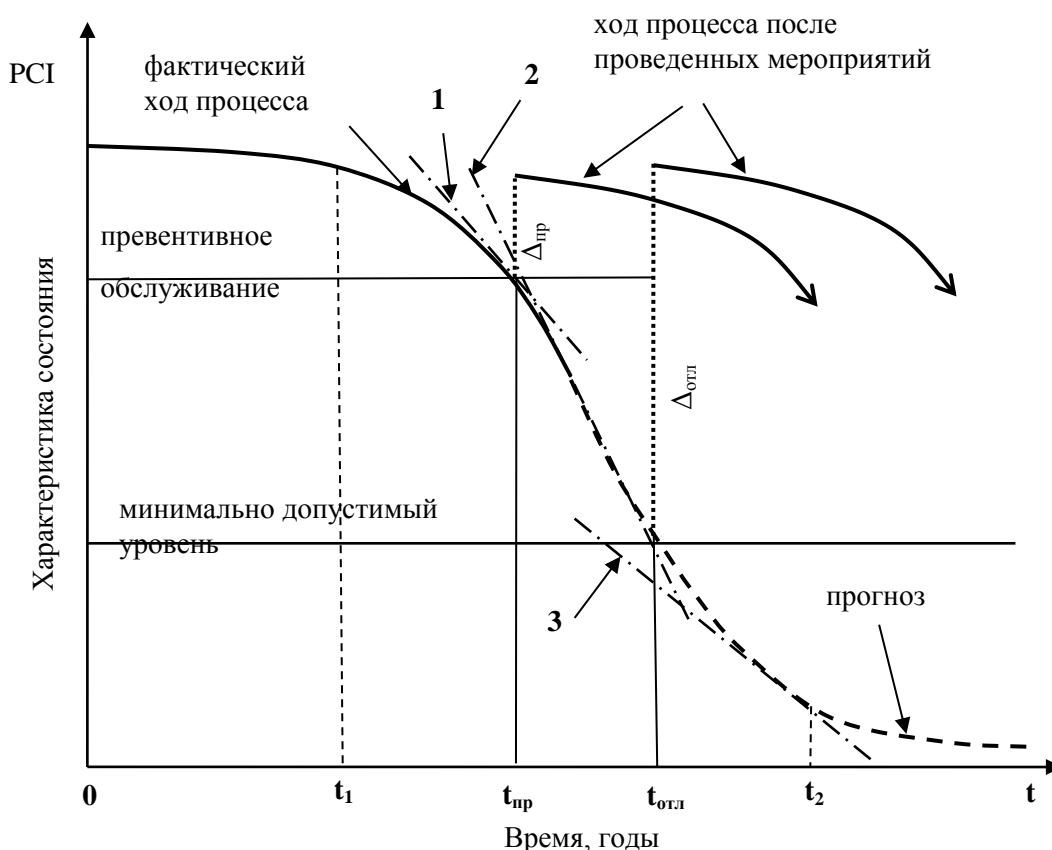


Рисунок 1 – Изменение состояния участка дороги и различные варианты мероприятий

Ход процесса изменения состояния соответствует сигмоидальной кривой общего вида, характерной для поведения участков дорог, находящихся в статических (мало изменяющихся со временем) условиях эксплуатации [1-5]. Для такого процесса характерно наличие трех основных стадий (периодов). Для первой стадии (начального этапа эксплуатации) характерно практически линейное поведение – медленное постепенное снижение эксплуатационных показателей. Этот этап соответствует отрезку времени $0-t_1$ (рис. 1). На

следующем этапе (отрезок t_1-t_2 , рис. 1) происходит значительное увеличение скорости разрушения дорожной одежды. И наконец, на заключительной стадии (отрезок с момента времени t_2) свойства конструкции вновь изменяются медленно, поскольку конструкция уже практически полностью разрушена и последующее разрушение невозможно.

Для дальнейшего количественного описания показателей процесса и сравнительной оценки эффективности различных стратегий введем следующие обозначения: P_{min} – минимально допустимый уровень состояния конструкции, Δ_{opt} – изменение показателя состояния конструкции в результате ремонтных мероприятий при отложенном обслуживании.

Минимально допустимый уровень состояния в рамках стратегии отложенного обслуживания соответствует моменту проведения мероприятий. При этом предполагается, что мероприятия представляют собой либо капитальный ремонт, либо реконструкцию.

В работе [6] дано следующее определение стратегии превентивного обслуживания: «превентивное обслуживание это стратегия, ориентированная в первую очередь на мероприятия по устранению небольших дефектов, остановке прогрессирующих разрушений и, как следствие, последующее уменьшение объема регламентных работ». Ключевым элементом в большинстве вариантов превентивного обслуживания является выбор момента проведения мероприятий. Для пояснения сути стратегии превентивного обслуживания вновь рассмотрим рис. 1.

Существенно, что на участке между моментами времени t_1 и t_2 происходит резкое ухудшение технико-эксплуатационных показателей. Поэтому ключевой задачей является выбор момента проведения мероприятий, что связано не только с требуемыми затратами, но и с различной скоростью процесса разрушения покрытия. Этот факт отражают отрезки прямых «1», «2», «3» – касательных к кривой хода процесса (рис. 1). Они соответствуют производным от функции, описывающей ход процесса, т.е. скорости разрушения покрытия.

Исходя из изложенного, в основу большинства алгоритмов реализации превентивного обслуживания положены схемы оптимизации момента проведения мероприятий. При этом одновременно проводится анализ

соответствующих затрат и сопоставление полученных прогнозов как с имеющимся бюджетом по годам (набор ограничений), так и между собой (выбор оптимального варианта). Для решения поставленных задач, как правило, выделяются две основные группы состояний: верхняя и нижняя. Верхняя (целевая) группа объединяет два состояния – отличное (очень хорошее) и хорошее. Нижняя группа объединяет состояния, неудовлетворительные с точки зрения модели (плохое, неудовлетворительное и удовлетворительное).

На данном этапе введем обобщенные количественные показатели:

- P_{np} – уровень состояния конструкции для назначения мероприятий в рамках стратегии превентивного обслуживания;
- Δ_{np} – изменение показателя состояния конструкции в результате ремонтных мероприятий при превентивном обслуживании;
- $\Delta_{eff} = \Delta_{отл} - \Delta_{np}$, где $\Delta_{отл}$ – повышение индекса состояния в результате работ при отложенном обслуживании, Δ_{eff} – разница в изменении значений индекса состояния при отложенном и превентивном обслуживании.

Для различных схем реализации превентивного обслуживания могут выбираться различные пороговые значения состояния (P_{np}) и различные объемы и типы работ (мероприятий).

Рассмотрим различия в методике и результатах применения этих двух стратегий.

Стратегия превентивного обслуживания в последнее время получает все большее распространение [7 - 9] несмотря на то, что отложенное обслуживание выглядит единственно возможным в условиях недостаточности финансирования. Поэтому для разработки эффективной схемы управления ресурсами следует, прежде всего, провести детальный сравнительный анализ этих схем.

Ключевым аспектом стратегии превентивного обслуживания является, как уже говорилось, выбор времени (момента) проведения мероприятий. При этом помимо технических вопросов возникают и вопросы экономической эффективности. Экономическую эффективность применения превентивного обслуживания в соответствии с [10] поясняет рис. 2.

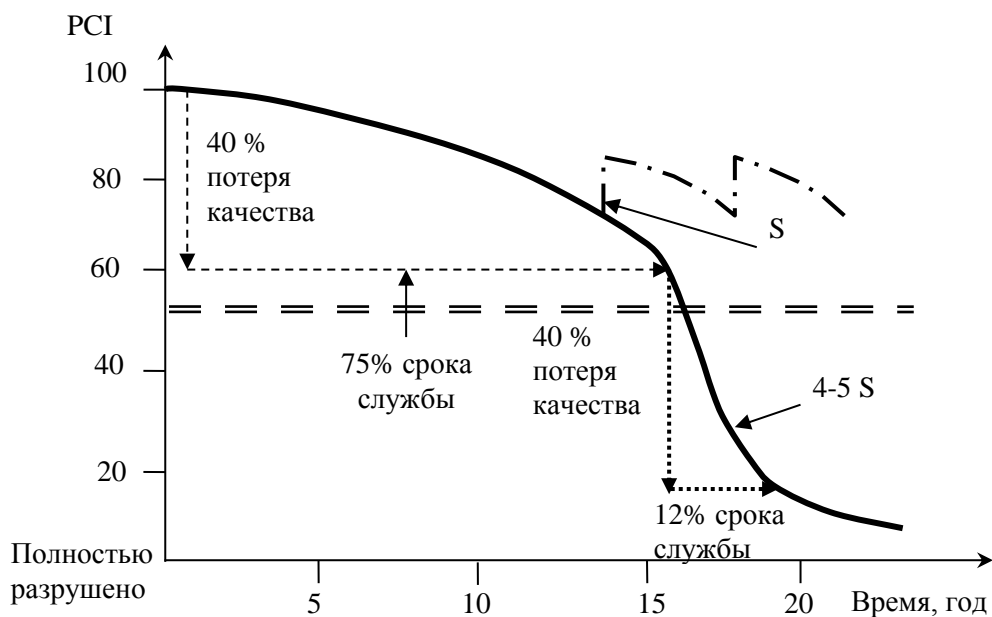


Рисунок 2 – Связь состояния дорожной одежды со сроком эксплуатации и эффективностью мероприятий [11]

Эта зависимость иллюстрирует важность правильности и своевременности проводимых мероприятий, что позволяет не только сэкономить средства, но и продлить срок службы дорожной одежды. Еще один значимый результат состоит в том, что частые, но небольшие затраты могут дать лучший результат в долгосрочной перспективе, чем проведение дорогостоящих ремонтов после того, как индекс состояния покрытия снизится до неудовлетворительного уровня (рис. 3, рис. 4).

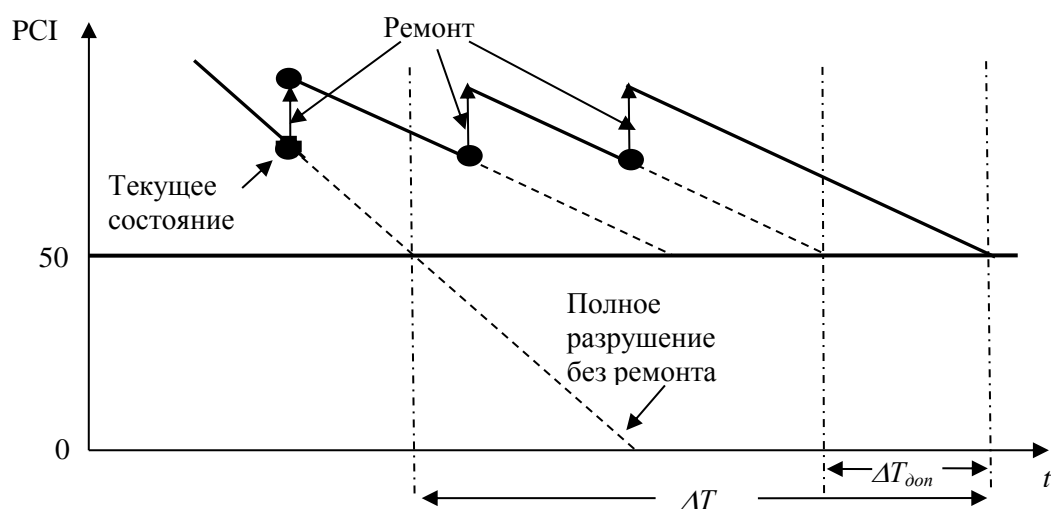


Рисунок 3 – Стратегия превентивного обслуживания: ΔT – продление срока службы, ΔT_{don} – дополнительный срок службы

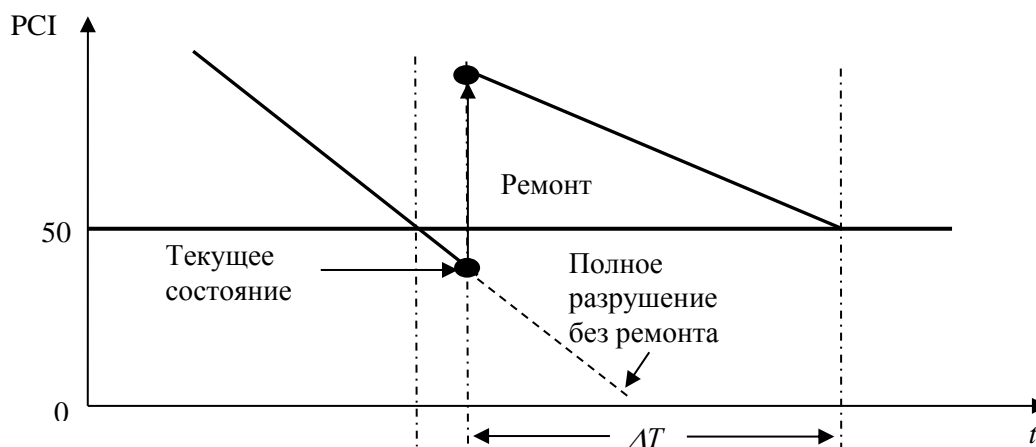


Рисунок 4 – Стратегия отложенного обслуживания: ΔT – продление срока службы за счет ремонта

За точку отсчета (с целью вычисления эффективности мероприятий) принято состояние, характеризующееся 50 % уровнем разрушения конструкции. Продление срока службы (ΔT) отсчитывается от момента достижения покрытием этого состояния до следующего момента, когда покрытие вновь окажется в данном состоянии. Через ΔT_{don} обозначен временной интервал, определяющий продление срока службы за счет трех профилактических мероприятий в сравнении с одним более дорогостоящим и объемным ремонтом в рамках модели отложенного обслуживания.

Диаграммы (рис. 3, рис. 4) для простоты построены в рамках линейных участков деградации, а различный наклон прямых (до и после обслуживания) учитывает нелинейность общей зависимости хода деградации покрытия от времени. Общий смысл приведенных диаграмм [11] состоит в следующем: первая диаграмма (рис. 2) иллюстрирует экономическую целесообразность превентивного обслуживания, две последующие (рис. 3, рис. 4) поясняют техническую сторону – увеличение срока службы дорожных одежд. Следует учитывать, что сравнение этих диаграмм показывает лишь теоретическую возможность повышения эффективности использования ресурсов в рамках стратегии превентивного обслуживания. Для корректного расчета эффективности следует учитывать не только стоимость непосредственно

ремонтных мероприятий, но и потери от неудовлетворительного состояния дорог.

Разработку моделей обслуживания следует начинать с выбора наборов основных переменных, характеризующих как технические (состояние конструкций), так и экономические (доступный бюджет и себестоимость мероприятий) аспекты. Далее на основе этого выбора формируются наборы ограничений и целевых функций.

В первую очередь определим набор общих показателей, к которым будем относить:

а) Π – множество интервалов продолжительностью один год каждый, в течение которых проводится оптимизация. Максимальным является срок службы конструкции до капитального ремонта либо реконструкции;

б) D_i – множество интервалов финансирования, где минимальный интервал, в течение которого выделяется финансирование, составляет один год. Например, D_{12} означает выделенный бюджет обслуживания на 2012 год;

в) C – множество возможных состояний конструкции. Может состоять из 5 либо 10 состояний. Принимаем для сокращения записи число состояний равным пяти:

- 5 – отличное;
- 4 – хорошее,
- 3 – удовлетворительное;
- 2 – неудовлетворительное;
- 1 – крайне неудовлетворительное (конструкция разрушена).

г) C_1 – первое подмножество состояний (1, 2, 3) – крайне неудовлетворительное, неудовлетворительное, удовлетворительное.

д) C_2 – второе подмножество состояний (4, 5) – хорошее, отличное.

е) $M_{n,m}$ – набор мероприятий, используемых в рамках предлагаемой модели. Индексы n и m означают вид мероприятий и состояние участка, к которому они применяются соответственно. Число возможных мероприятий примем равным 5:

- $n = 1$ – реконструкция;
- $n = 2$ – капитальный ремонт;
- $n = 3$ – слой усиления толщиной более 10 см;
- $n = 4$ – слой усиления толщиной менее 10 см;

- $n = 5$ – поверхностная обработка.

Таким образом, запись $M_{5,4}$ означает выполнение мероприятий (5) на участке, находящемся в хорошем состоянии (4).

Параметры модели:

а) $Y_{l,k}$ – удельные затраты на один километр одной полосы движения на проведение мероприятий l -го типа в течение k -го периода;

б) $K_{n,m}$ – протяженность участков (полос движения) в состоянии n в начале периода m ;

в) $P_{n,n-1}$ – скорость разрушения дорожных одежд, т.е. доля участков, переходящих в течение года из состояния n в состояние $n-1$. Для множества участков, на которых проводилось инструментальное обследование, эта величина известна точно (является детерминированной). Для остальных участков она может быть вычислена с вероятностью путем обобщения данных по обследованным участкам либо с помощью моделей прогнозирования (например, цепей Маркова).

г) $T_{n,m}$ – требуемое минимальное количество участков (километров полос движения) второго подмножества (C_2) в состоянии n на конец периода m . В отношении участков первого подмножества $T_{n,m}$ регулирует максимально допустимую протяженность.

д) $X_{n,m}$ – общее количество средств, затраченных на проведение мероприятий n -го типа в течение периода m .

В рамках данной модели $X_{n,m}$ является решающей переменной, а $K_{n,m+1}$ – зависимой. Иными словами, оптимизируется величина затраченных средств (при определенном наборе ограничений), а затем на основании этих результатов вычисляются соответствующие данные о состоянии участков сети на начало следующего периода или, что эквивалентно, на конец текущего периода. Следующий этап – формирование целевой функции и разработка алгоритма оптимизации.

При постановке задачи будем исходить из выбранных наборов показателей и переменных. В таком случае задача состоит в решении набора связанных уравнений и систем уравнений. Определим, что эту задачу составляют:

а) набор соотношений, обеспечивающих максимально высокую долю участков, находящихся в состояниях второго подмножества – C_2 (в отличном

либо хорошо) и минимизацию протяженности участков первого подмножества – C_1 после проведения в m –й период оптимальных мероприятий:

$$\begin{cases} (v_4 \cdot K_{4,m+1} + v_5 \cdot K_{5,m+1}) \rightarrow \max \\ (v_2 \cdot K_{2,m+1} + v_3 \cdot K_{3,m+1}) \rightarrow \min \\ K_{1,m+1} \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где v_2, \dots, v_5 – весовые коэффициенты, предназначенные для ранжирования значимости соответствующих состояний;

б) совокупность соотношений для определения объема средств, необходимых для выполнения требуемого набора мероприятий при условии (ограничении), что этот объем не превысит объема бюджета, выделенного на соответствующий период:

$$\begin{cases} (X_{1,m} + X_{2,m} + X_{3,m} + X_{4,m} + X_{5,m}) = \sum_{n=1}^5 X_{n,m} \rightarrow \min \\ \sum_{n=1}^5 X_{n,m} \leq D_m \quad \forall m \in \Pi \end{cases}; \quad (2)$$

в) соотношения, определяющие удовлетворение обязательных требований о минимально необходимой протяженности участков, находящихся в соответствующем состоянии:

$$\begin{cases} K_{1,m} = 0; \\ K_{2,m} = 0; \\ K_{3,m} \leq T_{3,m+1} \\ K_{4,m} \geq T_{4,m+1} \\ K_{5,m} \geq T_{5,m+1} \end{cases} \quad \forall m, (m+1) \in \Pi. \quad (3)$$

Литература

1. Расчет снижения модулей упругости нежестких дорожных одежд в процессе эксплуатации автомобильных дорог / В. К. Апестин, А. М. Шак,

- Ю. М. Яковлев // Труды ГипродорНИИ. – М., 1973. – Вып. 8. – С. 120 – 135.
2. Апестин В.К. Испытания и оценка прочности нежестких дорожных одежд. / В.К. Апестин, В.К. Шак А.М., Ю.М. Яковлев. – М.: Транспорт, 1977. – 102 с.
 3. Васильев, А. П. Принципы прогнозирования транспортно-эксплуатационного состояния дорог / А.П. Васильев, Ю.М. Яковлев, М.С. Коганзон // Автомобильные дороги. – 1993. – № 1. – С. 8-10.
 4. Красиков О.А. Обоснование стратегии ремонта нежестких дорожных одежд. Автореф. дис. д.т.н. М.: МДИ (ТУ). – 2000. – 44 с.
 5. Повышение надежности автомобильных дорог // Под ред. И.А. Золотаря. – М.: Транспорт, 1977. – 183 с.
 6. Hicks, R., Dunn, K., and Moulthrop, J. Framework for Selecting Effective Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements. / R. Hicks, K. Dunn, J. Moulthrop // Transportation Research Record – 1597(-1). – 1997. – PP. 1- 10.
 7. de la Garza J. M. Simulation of Highway Renewal Asset Management Strategies. / J. M. de la Garza, D. A. Krueger // Proceedings of the 2007 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering. ASCE, Pittsburg, Pennsylvania, July, 24-27, PP. 527 – 541.
 8. Zimmerman, K. A. Pavement Management Perspective On Integrating Preventive Maintenance Into A Pavement Management System / K. A. Zimmerman, D. G. Peshkin // Transportation Research Record. –1827(1). – 2003. – PP. 3 - 9.
 9. Wei, C. Development of Preventive Maintenance Decision Trees Based on Cost-Effectiveness Analysis: An Ontario Case Study. / C. Wei, S. Tighe //TransportationResearch Record. 2004. – 1866(1). – 2004. – PP. 9 - 19.
 10. Hicks R. Framework for Selecting Effective Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements./ R. Hicks, K. Dunn, J. Moulthrop, J. //Transportation ResearchRecord. – 1597(-1). – 1997. – PP. 1 - 10.
 11. Galehouse L. Innovative Concepts for Preventive Maintenance. // TransportationResearch Record. – 1998. – 1627(-1). – PP. 1- 6.