

Григорова Т.М., Усов А.В., д.т.н.

ОНПУ, г. Одесса

## АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ДВИЖЕНИЯ НА НИХ

*В работе проведен научный и системный анализ существующего опыта относительно использования систем управления состоянием сетей автомобильных дорог. Рассматриваемые системы отличаются большим разнообразием в отношении структуры, критериев оценки и моделей деградации основных закономерностей развития и накопления повреждений.*

### **Введение**

Управление состоянием автомобильных дорог осуществляется путем оптимального планирования и проведением мероприятий по ремонту и содержанию автомобильных дорог. Кроме того, постоянно растущие объемы пассажирских и грузовых перевозок предъявляют повышенные требования к контролю качества, безопасности и своевременности перевозок.

Проблемам управления состоянием автомобильных дорог и движением на них посвящен ряд работ, среди которых можно выделить [1, 2, 3, 4].

**Целью** данной работы является проведение анализа и систематизация научно-технической информации о существующем опыте относительно использования систем управления состоянием сети автомобильных дорог.

Первым этапом в разработке методов управления состоянием автомобильных дорог было обоснование дифференцированных сроков службы дорожных одежд и покрытий с учетом интенсивности движения, грузонапряженности автомобильных дорог и климатических условий эксплуатации. Такие системы практически не учитывали фактическое транспортно-эксплуатационное состояние конкретных участков автомобильных дорог.

Одной из первых попыток оценки состояния покрытия и прогнозирования объемов ремонтных работ в Украине явилась работа сотрудников ГосдорНИИ, в которой обобщены результаты и опыт наблюдений за состоянием усовершенствованных покрытий за период с 1965 г. по 1969 г. Рассматривались вопросы прогнозирования текущего ремонта и давалось технико-экономическое обоснование целесообразности назначения среднего ремонта. Расчеты проводились по укрупненным показателям со значительными приближениями и усреднениями. Предложенные математические зависимости учитывали только интенсивность движения и срок службы дорожных покрытий.

Наибольшее развитие и распространение системы управления состоянием автомобильных дорог, дорожных одежд и покрытий получили за границей. Такие системы (Pavement Management System - PMS) разрабатываются за рубежом уже более 25 лет. В значительной степени результаты этих исследований обобщены в материалах XX-го Международного дорожного конгресса в Монреале. Модели деградации состояния автомобильных дорог, на которых основаны PMS-системы, приведены в таблице 1.

Анализ приведенных данных показывает, что из 16 стран 7 имеют местные модели и 2 еще не определились. Это вполне закономерно. Различия в климатических условиях эксплуатации, конструкциях дорожных одежд, уровне и режимах воздействия транспортных нагрузок, определяют и особенности изменения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог.

Вопросами управления состоянием автомобильных дорог занимаются практически во всех развитых странах. При этом основное внимание уделяется систематическому наблюде-

нию за состоянием дорог и прогнозированию уровня их транспортно-эксплуатационного состояния.

Таблица 1  
Обобщение моделей деградации состояния дорожных одежд по материалам XX  
Международного дорожного конгресса

Страна	Т, лет	Параметры	Подход	Модели	Примечание
1	2	3	4	5	6
Италия	8	Sc, Sf, Rg	T-1, T-2, E-1	Усовершенст AASHO	Используется не для всех дорог
Швейцария	3	Sc, Rg, SC, Sf, Gl, Gk, Rv	E-4	Усовершенст AASHO, BISAR, Vesys	Федеральные магистральные до- роги. Сеть дорог
Франция	—	Rg, Sf, Sc, Ck, Rv, Rd	—	—	Основные дороги
Бельгия	4	Rg, Gb	T-1, E-1	Местный (BRRC)	Для ремонта сети второстепен- ных дорог
Великобритания	6	SC, RD, Rg, Sf	T-1, E-1	Местный (TRL)	На основных дорогах
Голландия	3	Rv, Ck, RD, Rg	E-1, T-2	Местный (IVON)	На основных магистралях
Германия	3	RD, Rg, Ck, Rv	E-4 статист	—	Автострады оценивают с 1992 г., федеральные дороги с 1993 г.
Австрия	—	Ck, RD, Rv, Sf, Rg, SC	—	—	Модели не использовали. Мест- ный подход
Словакия	1	SC, Ck, RD, Sf, Rg	T-1, E-1	Местные модели	Планирование ремонта на сети дорог
Дания	5	Rg, SC	T-1, T-2, T-3, T-4	AASHO усов. Местные	2 уровня: национальный и мест- ный
Финляндия	5	SC, RD, Rg, Ck	E-1	AASHO Мест. модели	На всех общественных дорогах
Норвегия	4	RD, Rg	E-1	AASHO	На всех дорогах. Уровень сети
Польша	—	SF, SC, Ck, Rv, Rg, RD	E-1	Местные модели	С 1995 года
Австралия	15	Rg, RD, Ck, Sf, Gl	E-1	AASHO, HDM NOS, NIMPAC	Используются разными штатами
Канада	2	Rg	E-1	AASHO	Уровень сети
США	35	SE, Rg, RD, Ck	E-1, E-3, T-1, T-2	AASHO, VESYS	Все дороги
Япония	12	Gl	E-1	AASHO усов.	На определённых национальных магистралях

Расшифровка приведенных в таблице индексов: ST — возможность обслуживания; G1 — глобальный индекс; Sf — поверхностное трение и сопротивление заносу; Rg — шероховатость или неровности; RD — глубина колеи; SC — модуль упругости; Ck — разрушение; Rv — ровность; T — теоретический; E — эмпирический; 1 — полевые методы; 2 — лабораторные методы; 3 — ускоренные испытания нагрузкой; 4 — комбинированные (1-3).

В Финляндии разработаны модели для прогнозирования интенсивности образования деформаций и разрушений дорожных покрытий. Так, например, для асфальтобетонных покрытий модель имеет вид

$$VS = 92,4 + 0,23T^2 + 42,1(E_M/E_T), \quad (1)$$

где  $VS$  — доля разрушений покрытия,  $m^2/100 m^2$ ;

$T$  — срок службы покрытия;

$E_M$  — расчетный модуль упругости дорожной одежды;

$E_T$  — фактический модуль упругости дорожной одежды в расчетный период.

Недостатком математической модели (1) является то, что она разработана только для черных и белых щебеночных покрытий. В Украине белые щебеночные покрытия применяются редко, а климатические условия эксплуатации автомобильных дорог существенно отличаются от условий эксплуатации дорог Финляндии.

В дорожной практике Германии уже много лет качество покрытия оценивается по показателям ровности и шероховатости. Измерения производятся с помощью специальных приборов, а данные фиксируются в картотеке для последующего использования в обосновании необходимости проведения ремонтов или реконструкции дорог.

Основная цель систем управления состоянием автомобильных дорог — использование надежной исходной информации и определение критериев оценки принимаемых решений при разработке эффективной и экономичной программы строительства и содержания дорожных одежд. Система управления состоянием дорожных одежд ориентирована на достижение наилучших результатов создания и эксплуатации дорожных одежд, возможных в рамках доступных средств. Основные этапы создания систем управления состоянием дорожных одежд:

1 этап. Предварительные исследования. Включает выбор методов исследования и разработку предварительного плана. Завершается созданием рабочей комиссии и приглашением консультантов.

2 этап. Накопление банка данных. Включает разработку методики, сбор данных и их обобщение. Завершается оценкой состояния дорожной сети и обоснованием необходимых мероприятий по их ремонту и содержанию.

3 этап. Реализация результатов. Включает разработку стратегии анализа и программы оптимизации, использование методики соблюдения транспортных требований к дорогам и составление бюджета расходов. Завершается этап созданием альтернативных стратегий содержания и ремонта дорог, выбором программ приоритетных работ, корректировкой бюджета, обоснованием требований к бюджету для обеспечения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог.

Детали системы управления состоянием автомобильных дорог зависят от конкретных условий эксплуатации и экономического развития государства. Однако в любой системе должны быть подсистемы: а) информационная подсистема; б) подсистема стратегии эксплуатации сети дорог, способная моделировать общие условия их работы в течение всего срока службы; в) подсистема оптимизации, всегда необходимая в случаях, когда потребность в затратах превышает выделяемые ассигнования; г) подсистема отчетности. Все подсистемы должны иметь соответствующее компьютерное обеспечение.

Информационная подсистема системы управления состоянием автомобильных дорог обеспечивает пользователей объективной информацией, необходимой для принятия решений и прогнозирования интенсивности ухудшения транспортно-эксплуатационного состояния во времени. Прогнозирование транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог необходимо при разработке стратегии управления, требований к состоянию покрытий в различные периоды эксплуатации и при установлении оплаты за проезд по дорогам при экономическом анализе дорожных проектов.

Основными показателями состояния автомобильных дорог на стадии эксплуатации являются ровность дорожных покрытий, сцепные качества автомобильных дорог и прочность дорожных одежд.

Проведем анализ известных моделей прогнозирования состояния дорожных одежд и покрытий.

В модели прогнозирования износа дорожных покрытий учитывают воздействие движения транспортных средств, влияние окружающей среды и проводимых эксплуатационных ме-

роприятий. В основу модели положена оценка пяти характерных видов повреждений: образование трещин, выкрашивание и шелушение покрытий, образование выбоин и колеи, потеря ровности. Рассмотрев указанные выше виды повреждений можно сделать вывод о том, что принятие износа в данной модели трактуется более широко, чем это принято в нашей стране.

Для оценки износа используют величины модифицированного обобщенного показателя толщины или прогибов дорожной одежды, измеренных балкой Бенкельмана (прогибомером).

$$M_{ОД} = 0,0394(K_1H_1 + K_2H_2 + K_3H_3) + M_{ГР}, \quad (2)$$

где  $K_1$  — коэффициент прочности слоя покрытия толщиной  $H_1$  (мм);

$K_2$  — то же для верхнего слоя основания толщиной  $H_2$  (мм);

$K_3$  — то же для нижнего слоя основания толщиной  $H_3$  (мм);

$M_{ГР}$  — составляющая величина подстилающего слоя грунта.

Характерные величины коэффициентов: для асфальтобетонного покрытия в эксплуатации — 0,41, для щебеночных оснований — 0,12, для нижнего слоя оснований — 0,10. Для применения этих коэффициентов необходимо выполнить дополнительные исследования, так как качество используемых материалов, качество строительных работ и уровень эксплуатационного содержания явно уступают среднеевропейским.

Значение составляющей величины подстилающего слоя грунта определяют по формуле

$$M_{ГР} = 3,311gq - 0,851g^2q - 1,43, \quad (3)$$

где  $q$  — число несущей способности «CBR».

Число несущей способности подстилающего слоя грунта определяют вдавливанием цилиндрического штампа диаметром 5 см в образец грунта или материал конструктивных слоев дорожной одежды, уплотненный в цилиндрической форме диаметром 20 см. Штамп вдавливают со скоростью 1,25 мм/мин на глубину 1 и 2 дюйма. Измеренное давление, деленное на 100, принимают за характеристику прочности грунта. Перед испытанием грунт увлажняют путем капиллярного насыщения водой. Тогда

$$M_{ОД} = 6,5\lambda^{-1,6}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — прогиб поверхности покрытия.

Период до появления трещин в покрытии прогнозируют по формуле

$$T_{ГР} = 4,21 \exp(0,319M_{ОД} - 17,1N / M_{ОД}^2), \quad (5)$$

где  $N$  — суммарное количество проходящих за год по одной полосе движения автомобилей, приведённое к эквивалентному количеству стандартных осевых нагрузок, млн. авт.

Площадь, охваченная образованием трещин, оценивается по зависимости

$$\delta_{ГР} = 1,76\omega_{\min}^{0,32}T, \quad (6)$$

где  $\delta_{ГР}$  — увеличение площади затронутой трещинами, % общей площади;

$T$  — период времени, лет;

$\omega_{\min}$  — наименьшая величина от первоначальной площади участка дорожного покрытия, затронутого трещинами, % общей площади покрытия.

Прогнозирование срока начала разрушения покрытия от выкрашивания рекомендуется выполнять по зависимости [5]:

$$T = K_{ГР} \left[ 10,5 \exp(-0,655K_{СТР} + 0,156N_{ОБЩ}) \right], \quad (7)$$

где  $K_{ПР}$  — коэффициент распространения на покрытиях слабых (0,54), средних (0,97) и прочных (1,49) участков;

$K_{СТР}$  — коэффициент качества постройки.  $K_{СТР} = 0$  если качество покрытия хорошее и 1 при низком качестве строительства;

$N_{ОБЩ}$  — количество осей автомобилей всех типов, прошедших за год по полосе движения, млн. шт.

Увеличение площади выбоин (прирост площади выбоин определяют в %, но не более 10) при отсутствии ремонта за рассматриваемый период можно прогнозировать по зависимости

$$\delta_{ВЫБ} = \omega [kN_{ОБЩ} (P + 0,1)], \quad (8)$$

где  $\omega$  — площадь выбоин в начале года, % от общей площади покрытия;

$k$  — коэффициент скорости роста ямочности при основаниях дорожных одежд из зернистых необработанных материалов определяют по формуле

$$k = (2 - 0,2H), \quad (9)$$

где  $H$  — общая толщина слоёв покрытия из асфальтобетона, см;

$P$  — среднее количество осадков, м/месяц.

Согласно известным расчетам [4] среднюю глубину колеи на дорожном покрытии можно прогнозировать по зависимости

$$H = T_{СЛ}^{0,166} M_{ОД}^{-0,502} K_{УПЛ}^{2,3} N^C, \quad (10)$$

где  $T_{СЛ}$  — срок службы дорожного покрытия с момента его укладки или капитального ремонта;

$K_{УПЛ}$  — степень уплотнения покрытия по отношению к стандартному по методике ААШТО. Например, 98% плотности по модифицированной методике соответствует степени уплотнения 1;

$N$  — суммарное количество проходов осей, приведённых к расчетной нагрузке 80 кН;

$C$  — показатель степени при  $N$ .

$$C = 0,0902 + 0,0384\lambda - 0,009J + 0,00158P\Omega, \quad (11)$$

где  $J$  — относительное состояние покрытия после ремонта; для капитального ремонта  $J = 1$ , для новых покрытий  $J = 0$ ;  $\Omega$  — расчетный параметр.

$$\Omega = 0,62\omega + 0,39\gamma, \quad (12)$$

где  $\omega$  — относительная площадь трещиноватых участков, %;

$\gamma$  — относительная площадь широких трещин, %.

Для прогнозирования снижения ровности дорожных покрытий в процессе эксплуатации автомобильных дорог предложена зависимость [5]

$$S_Z = 134 \exp(0,023T_C) M_{ДЕФ}^{-5} N + 0,114H_K + 0,0066\delta_T + 0,42\delta_B + 0,023S, \quad (13)$$

где  $S_Z$  — увеличение за год показателя ровности IRI, м/км;

$M_{ДЕФ}$  — модифицированный обобщённый показатель прочности дорожных одежд с учётом накопленных деформаций.

$$M_{ДЕФ} = 1 + M_{ОД} - 0,0000758H_{ТР}\Omega, \quad (14)$$

где  $H_{TP}$  — толщина растрескавшегося слоя покрытия, мм;

$H_K$  — среднее квадратичное отклонение глубины образовавшейся колеи, мм;

$\delta_T$  — увеличение приведённой площади покрытия с трещинами, %;

$\delta_B$  — увеличение площади покрытия, затронутой выбоинами, %

$S$  — величина международного показателя ровности в начале года, мм/м.

Известна методика приближенного прогнозирования деградации ровности дорожного покрытия. По этой методике изменение ровности определяют по зависимости

$$S_T = 0,98e^{mT} \left[ S_0 + 135M^{-5}N_m \right] + 0,143H_K + 0,0068\omega_T + 0,05\omega_P, \quad (15)$$

где  $S_T$  — международный показатель ровности IRI через  $T$  лет после постройки или капитального ремонта;

$m$  — параметр, учитывающий климатические условия;

$S_0$  — показатель IRI сразу после ремонта или постройки;

$M$  — модифицированный обобщённый показатель прочности дорожной одежды.

$$M = 1 + M_{ОД} - 0,00004H_m\omega_m, \quad (16)$$

где  $H_m$  — суммарная толщина связных слоёв дорожной одежды, мм;

$\omega_m$  — площадь ямочных ремонтов, выполненных за  $T$  лет, м<sup>2</sup>.

Если нет сведений о начальном состоянии покрытий, то рекомендуется применять формулу

$$S_T = 1,04e^m \left[ S_0 + 263(1 + M)^{-5} N_m \right]. \quad (17)$$

Формула (17) справедлива при малом количестве трещин, затрагивающих не более 30 % покрытия.

Все приведенные зависимости, являясь эмпирическими зависимостями, не могут быть однозначно применены для прогнозирования состояния автомобильных дорог общего пользования в современных условиях, поскольку основаны на обобщении и анализе сведений об эксплуатации сети дорог в отличных от условий в Украине. Кроме того, ряд показателей эксплуатационного состояния не используется в нашей стране, что дополнительно усложняет применение рассмотренных моделей.

Приведенные выше системы управления транспортно-эксплуатационным состоянием автомобильных дорог, основаны на моделях деградации состояния дорог в условиях эксплуатации стран разработчиков этих моделей. С учетом того, что в пределах одной страны разные регионы имеют собственные модели оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог с критериями не соответствующими системе показателей эксплуатационного состояния дорог в Украине, приведенные модели теряют свою актуальность и практическое значение в нашей стране.

Аналогичные выводы справедливы и для моделей Мирового Банка HDM, получивших наибольшее развитие в последние годы. В данных моделях обобщен опыт эксплуатации систем планирования развития и содержания автомобильных дорог США, Великобритании и Франции, а также результаты многолетних экспериментов по апробации моделей в ряде развивающихся стран. Общая архитектура системы HDM-4 представлена на рис. 1.

Необходимо отметить, что модель HDM-4, по выявленным ранее причинам, также не может быть использована в Украине, поскольку базируется на закономерностях, характерных для условий эксплуатации автомобильных дорог Европы и США.

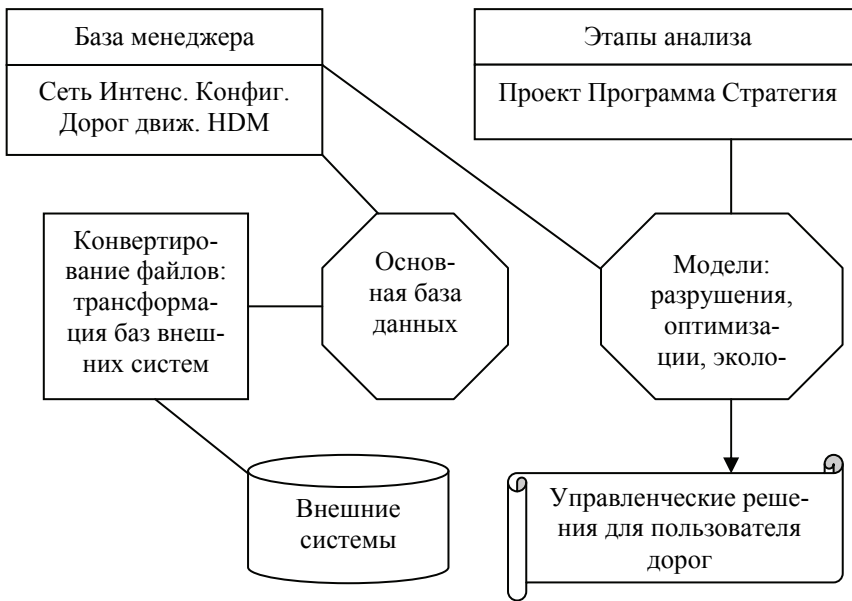


Рис. 1. Архитектура системы HDM-4

Второе важное обстоятельство, которое следует учитывать при оценке возможности внедрения западных систем управления состоянием дорог, заключается в том, что в основе функций оптимизации распределения ресурсов на ремонт и содержание дорог лежат технико-экономические зависимости, полученные по результатам экономического анализа на основе показателей работы сети автомобильных дорог в экономических условиях стран — разработчиков систем управления. Естественно, что значения оптимумов по

экономическим показателям не имеют ничего общего с аналогичными значениями для экономических условий Украины. Поэтому работа подсистем стратегии планирования в системах PMS не позволяет принять оптимальные экономические решения.

### Выводы

Анализ существующих систем управления состоянием сети автомобильных дорог показывает, что системы отличаются большим разнообразием структур, критериев оценки состояния дорог и положенными в основу моделями деградации (закономерности развития и накопления повреждений дорожной одежды). Основы моделей — эмпирические зависимости, которые по своей природе отражают взаимодействие непосредственно в том объекте исследования, для которого они были получены с учетом многофакторности процесса разрушения дорожной одежды. Указанные аспекты раскрывают значительные трудности в практическом применении существующих моделей в разных странах. Необходимость учета экономических факторов в системах управления состоянием сети автомобильных дорог приводит к практически полному отсутствию возможности эффективного применения в Украине существующих систем.

### Список литературы

1. Алексеев О.П. Новая информационная технология управления дорожной отраслью. — К.: УМК ВО, 1991. — 216 с.
2. Алексеев О.П. Автоматизированная информационно-управляющая система для принятия управленческих решений в дорожной отрасли // Тр. конф. «Повышение качества строительства дорог». — Владимир: ВПИ, 1985. — С. 48-49.
3. Бируля А.К., Михович С.И. Работоспособность дорожных одежд. — М.: Транспорт, 1966. — 172 с.
4. Григоров М.А. Информационное обеспечение для оптимизации транспортных потоков. — Одесса: Астропринт, 2004. — 392 с.
5. Григоров М.А., Дашенко А.Ф., Усов А.В. Проблемы моделирования и управления движением транспортных потоков в крупных городах. — Одесса: Астропринт, 2004. — 272 с.

Стаття надійшла до редакції 02.10.06  
© Григорова Т.М., Усов А.В., 2006