

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На основе анализа моделей оценки и прогнозирования состояния дорожной одежды обоснован необходимый набор переменных, определяющих текущее состояние конструкции. Разработан подход к оценке и прогнозированию состояния дорожной одежды с привлечением результатов георадарного обследования автомобильных дорог.

Ключевые слова: дорожная одежда, внутренние параметры, оценка состояния, прогнозирование.

Основная цель всех моделей деградации покрытия – на основании собранных наборов данных с помощью соответствующей обработки дать как можно более точный и достоверный прогноз процесса разрушения дорожных одежд.

При использовании простейших классических статических регрессионных моделей прогнозирования в роли основного параметра выступает, как правило, индекс состояния покрытия, а процесс деградации дорожной конструкции описывается с помощью его однозначных значений, вычисляемых на основе данных о предшествующих состояниях конструкции. В рамках стохастических (вероятностных) моделей прогнозируется вероятность того, что в определенный момент в будущем конструкция окажется в определенном состоянии. Среди вероятностных моделей в свою очередь также можно выделить несколько основных направлений – анализ с помощью Марковских цепей, эконометрических методов и методов теории надежности [1]. Для решения задач прогнозирования с полным набором исходных данных все более широкое применение находят динамические модели, позволяющие учесть изменение хода процесса деградации во времени.

В ситуациях, когда неизвестны либо не могут быть в полной мере учтены все механизмы, определяющие ход разрушения конструкции, построение точной аналитической модели ее деградации невозможно. Именно наличие неопределенностей, принципиально присущих процессу эксплуатации дорожных одежд, и является первопричиной всех трудностей построения чисто механистических моделей для точного описания эволюции их состояния. Эти неопределенности связаны:

- а) с недостатком информации (неполнотой наборов исходных данных);
- б) с вероятностным характером внешних факторов (погодноклиматические условия, транспортные нагрузки и пр.).

Общим недостатком всех рассмотренных подходов является ограниченный набор входных данных (объясняющих переменных). Кроме того, известные методы оценки состояния дорожной одежды опираются в основном на внешние признаки разрушения конструкции. Математически этот факт можно сформулировать следующим образом:

$$F = f(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M),$$

где  $F$  - характеристика состояния покрытия ( $J, PSI, PCD$ );

$d_j$  - внешние параметры.

Проведенный анализ показал, что в настоящее время не существует универсальных моделей оценки и прогнозирования состояния автомобильных дорог как на сетевом уровне, так и на уровне отдельных участков. Существующие модели и методики не учитывают в полной мере возможностей современных средств подповерхностного зондирования (георадаров). Недостаточность информации о текущем состоянии обследуемых участков приводит к необходимости проведения достаточно сложного анализа с привлечением различных вероятностных подходов, что, в конечном итоге приводит к значительным погрешностям в прогнозных оценках. Проф. Леонович И.И. отмечает что, несовершенство системы диагностики может привести и к некорректным управленческим решениям [2]. В работе [3] также подчеркивается, что ненаблюдаемые (подповерхностные) неоднородности в силу того, что они способствуют ускоренному разрушению конструкции, должны учитываться в моделях прогнозирования посредством дополнительных «шумовых» поправок.

Таким образом, задачи прогнозирования состояния дорожной одежды должны решаться с учетом действия различных факторов, влияющих на поведение конструкции во времени, среди которых можно выделить две основные группы. Первая группа факторов - внешние факторы, достаточно хорошо изучена и включает в себя [4]:

- а) интенсивность движения (и величина связанных с этим нагрузок);
- б) возраст конструкции;
- в) мероприятия по ремонту и содержанию;
- г) климатические и другие природные факторы.

Вторая группа содержит менее изученные внутренние факторы, оказывающие влияние как на несущую способность дорожной одежды, так и на способность материалов сопротивляться действию растягивающих и сдвигающих напряжений:

- а) толщина конструктивных слоев дорожной одежды;
- б) влажность слоев основания и грунтов земляного полотна;
- в) плотность конструктивных слоев дорожной одежды;

г) наличие подповерхностных дефектов в слоях покрытия и укрепленных слоях основания.

В таком случае предлагаемая модель функции оценки текущего состояния дорожной одежды будет иметь вид:

$$F = f(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M | \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_N), \quad (1)$$

где  $\chi_i$  - внутренние (скрытые) параметры.

Очевидно, что роль этих параметров обусловлена не только их влиянием на текущее состояние конструкции, но и тем, что, вызывая преждевременное разрушение дорожной одежды, они также будут косвенным образом определять потери от снижения скорости перевозок в будущем. Кроме того, мероприятия по ремонту и содержанию, назначенные без учета внутренних параметров дорожной одежды, приведут к необходимости преждевременных повторных ремонтов, т.е. к неэффективному расходованию материальных и финансовых ресурсов.

Общая адаптивная модель деградации дорожной одежды может быть математически сформулирована в виде следующего соотношения:

$$P_{ob,t} = P_{in,t} + \alpha_t + \xi_t, \quad (2)$$

где  $P_{ob,t}$  - реально существующее состояние процесса деградации дорожной конструкции в момент времени  $t$ ;

$P_{in,t}$  - состояние процесса деградации конструкции в соответствии с принятой базовой моделью, т.е. расчетное состояние, например, в соответствии с механистической моделью;

$\alpha_t$  - структурное отклонение реального процесса деградации от модельного, т.е. расчетного;

$\xi_t$  - поправка для учета влияния случайных возмущений.

Смысл соотношения (2) заключается в том, что модель деградации покрытия учитывает не только влияние на процесс деградации случайных внешних факторов (слагаемое  $\alpha_t$ ), но и наличие случайных погрешностей измерений (слагаемое  $\xi_t$ ).

Процедура измерения состояния системы может быть в общем виде записана с помощью следующего соотношения:

$$\hat{L} P_t = P_{ob,t} + \chi_t,$$

где  $\chi_t$  - поправка для учета случайной погрешности результатов измерений.

$$\hat{L} P_t = P_{in,t} + \sum_{j=1}^N \frac{\alpha_t^{(j)}}{j!} \delta^j + \xi_t + \chi_t.$$

Данная модель отражает особенности процесса измерений, связанные с наличием случайных погрешностей.

В работе предложено ввести понятие целевой функции  $\psi_t$ , которую требуется минимизировать и которая определена как:

$$\psi_t = \hat{L} P_t - P_{in, t} = \hat{L} P_{ob, t} + \chi_t - P_{in, t} = \sum_{j=1}^N \frac{\delta^j}{j!} \alpha_t^{(j)} + \xi_t + \chi_t. \quad (3)$$

Объединяя влияние случайных погрешностей измерения, т.е. положив:

$$\xi_t + \chi_t = \rho_t,$$

удобно переписать (3) в более компактной форме:

$$\psi_t = D \cdot \alpha_t + \rho_t, \quad (4)$$

где  $D$  - вектор с компонентами  $1, \frac{\delta}{1}, \frac{\delta^2}{2!}$ , а точкой обозначено

скалярное произведение этого вектора на вектор поправок  $\alpha$ .

Предлагаемый подход к прогнозированию сводится к корректировке модели прогноза (как правило, статической) путем минимизации целевой функции  $\psi_t$  (расхождения между теоретической оценкой состояния дорожной одежды, полученной на основании базовой прогнозной модели, и оценкой, полученной по результатам обследования).

Для оценки состояния отдельных участков и прогнозирования деградации дорожных одежд с привлечением георадарных технологий предлагается следующую комплексную схему (рис. 1).

Особенностями данной схемы являются:

1. Привлечение более полного набора данных о характеристиках элементов (слоев) конструкции дорожной одежды (1). В качестве внешних переменных модели используются:

а) параметры, характеризующие упругие свойства конструкции дорожной одежды в целом, – упругий прогиб ( $l_{упр}$ ), вычисленное значение фактического модуля упругости ( $E_{факт}$ );

б) фактические значения растягивающих напряжений в монолитных слоях ( $\sigma_r$ ) и касательных напряжений ( $\tau$ ) в грунтах земляного полотна и слоях из несвязанных материалов.



Рис. 1. Комплексная схема оценки и прогнозирования состояния дорожных одежд

В качестве внутренних переменных модели используются:

а) механические параметры конструктивных слоев дорожной одежды - плотность, определяющая наличие зон разуплотнения ( $\rho$ ), а также механические параметры грунтов земляного полотна - влажность ( $w_i$ ) в долях от влажности на границе текучести ( $w_T$ );

б) геометрические параметры конструктивных слоев дорожной одежды - фактическая толщина слоев  $h_i$ ;

в) структурная неоднородность конструктивных слоев дорожной одежды, характеризуемая наличием подповерхностных дефектов в слоях покрытия и укрепленных слоях основания в виде трещин высотой  $h_{трещ}$  и шириной раскрытия  $b_{трещ}$ . Кроме того, к параметрам, характеризующим структурную неоднородность конструктивных слоев дорожной одежды, следует отнести коэффициент вариации толщины -  $C_{vh}$ ;

г) электрофизические параметры материалов конструктивных слоев дорожной одежды – диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon$ ).

2. Использование указанного набора данных в модели оценки фактического состояния конструкции дорожной одежды на стадии эксплуатации. Модель оценки включает как расчет коэффициента запаса прочности по допускаемому уругому прогибу на основе результатов измерений внешних параметров ( $l_{унр}$ ), так и расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, исходными данными для которого являются внутренние параметры ( $h_i, w_i, \rho, h_{трещ}, b_{трещ}$ ).

3. Применение для прогнозирования деградации отдельных участков (секций) дорог адаптивных динамических моделей (2, 4), опирающихся на более полные наборы данных, полученных с помощью георадарных технологий;

4. Прогнозирование состояния сети дорог и оптимизация затрат с помощью стохастических моделей на основе Марковских цепей ( $P(t_2) = P_T \cdot P(t_1)$ ,  $P(t_3) = P_T^2 \cdot P(t_1)$ ) с использованием максимально полного набора данных.

### Список использованных источников

1. Madanat, S. Estimation of Infrastructure Distress Initiation and Progression Models./ S. Madanat, S. Bulusu, A. Mahmoud // Journal of Infrastructure Systems – 1995. – №1. – P.146-150.

2. Буртыль, Ю.В. Совершенствование методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог / Ю.В. Буртыль, И.И. Леонович // Автомобильные дороги и мосты. – № 8. – 2010. – С. 95–105.

3. Chu C.Y. Empirical Comparison of Statistical Pavement Performance Models / C.Y. Chu, P.L. Durango-Cohen. // Journal of Infrastructure Systems. – 2008. – Vol. 14. – No. 2. – P. 138-149.

4. Слободчиков Ю.В. Обоснование оценочных показателей выбора ремонтной стратегии автомобильных дорог с дорожными одеждами нежесткого типа в изменяющихся условиях эксплуатации – М.: Инфрмавтодор, 1994. – 189 с.

#### **Анотація**

На підставі аналізу моделей оцінки та прогнозування стану дорожнього одягу обґрунтовано необхідний набір змінних, які визначають поточний стан конструкції. Розроблено підхід щодо оцінки та прогнозування стану дорожнього одягу із залученням результатів георадарного обстеження автомобільних доріг.

Ключові слова: дорожній одяг, внутрішні параметри, оцінка стану, прогнозування.

#### **Annotation**

The method for determining the thickness of the structural layers of pavement using GPR technology is presented. The proposed methodology relies on pulse signals processing algorithm. The results of field experiments on the testing of the algorithms and techniques on public roads are discussed.

Keywords: ground penetrating radar, the thickness of the structural layers, the dielectric constant.