

Анализ подходов к прогнозированию колееобразования в отечественной и зарубежной практике

А.А. Бобкин, А.Н. Тиратурян

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация: В статье проведён сравнительный анализ подходов прогнозирования колееобразования, используемых в России и США. Рассмотрены механико-эмпирическое руководство по проектированию покрытий (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) и отечественные нормативные документы, выявлены их ключевые различия в точности прогнозов, применимости и сложности расчётов.

Ключевые слова: колееобразование, прогнозирование дорожных конструкций, пластические деформации, механико-эмпирическое руководство по проектированию покрытий, мониторинг состояния дорог, нормативные методики.

Актуальность проблемы колееобразования в дорожной инфраструктуре обусловлена непрерывным ростом интенсивности движения и увеличением осевых нагрузок транспортных средств, что приводит к значительному ускорению износа дорог. Колея, формирующаяся на проезжей части под воздействием повторяющихся динамических и статических нагрузок, является одним из наиболее распространённых и опасных дефектов дорожного покрытия [1,2]. Её возникновение связано с накоплением пластических деформаций в слоях дорожной одежды, вызванных внешними (рис.1) (климат, интенсивность движения, сезонные колебания температуры) и внутренними факторами (состав материалов, технология укладки, физико-механические характеристики материалов) [3,4].



Рис. 1. Факторы, влияющие на интенсивность колееобразования

Особенно остро эта проблема стоит в регионах с экстремальными климатическими условиями, таких как Крайний Север и Юг России.

Неравномерное распределение нагрузок из-за колеи приводит к ускоренному износу транспортных средств (подвески, шин), а также к дополнительным расходам на содержание и ремонт дорожных конструкций.

Динамика роста затрат на ремонт дорог из-за колееобразования в Российской Федерации за 2019–2024 годы представлена в таблице 1.

Таблица 1

График роста затрат на ремонт дорог в РФ (2019–2024 гг.)

Год	Затраты, млрд руб.
2019	10,2
2020	11,5
2021	13,1
2022	14,8
2023	16,3
2024*	17,9

* Прогноз на основе данных Федерального дорожного агентства

По данным Федерального дорожного агентства, ежегодный прирост расходов на ремонт составляет около 12 %, что свидетельствует о необходимости совершенствования существующих методов прогнозирования колеи.

Кроме того, колееобразование существенно снижает не только комфорт, но и безопасность дорожного движения, поскольку изменение сцепления колес с покрытием повышает риск аквапланирования и увеличивает тормозной путь транспортных средств. Установлено, что уже к 5 году эксплуатации покрытие накапливает деформацию, значительно увеличивающую вероятность ДТП [5].

К основным причинам колееобразования можно отнести [6]:

- использование водителями шин с шипами, способствующих быстрому истиранию покрытия;
- несоблюдение методики строительства;
- применение материалов низкого качества;
- несовершенство методики проектирования.

В виду выше изложенного многие страны ведут поиск решений по повышению устойчивости дорожных одежд к накоплению пластических деформаций [7].

В мировой практике были разработаны различные методы прогнозирования колеи, позволяющие учитывать особенности используемых материалов и характер нагрузок.

Значительных успехов в этом вопросе достигли в США. Разработанное в начале тысячелетия Американской ассоциацией государственных чиновников автомобильных дорог и транспорта (American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO) механико-эмпирическое руководство по проектированию покрытий (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG) [8] заменило устаревшие эмпирические методы, применявшиеся с середины XX века, и представляет собой динамически развивающуюся методику, регулярно обновляемую с учетом новых научных данных и калибровки моделей.

Основные этапы прогнозирования по MEPDG:

1. Определение исходных данных: климатические параметры, осевые нагрузки, характеристики материалов, региональные особенности дорог.
 2. Расчет напряжений и деформаций в слоях дорожной одежды с применением численных методов и компьютерного моделирования.
 3. Калибровка модели с использованием данных о фактическом износе дорожных покрытий и результатов полевых наблюдений.
-

4. Оценка накопления пластических деформаций и прогнозирование глубины колеи на различные периоды эксплуатации с учетом динамических нагрузок и климатических факторов.

Данный подход, основанный на принципах инженерной механики и проверенный многочисленными испытаниями, заменил ограниченные в своих возможностях эмпирические модели, давая значительный прирост в точности проектирования дорожных одежд и прогнозирования их поперечной и продольной ровности и прочности [9].

На сегодняшний день это руководство стало основным инструментом проектирования дорожных покрытий и применяется более чем в 30 штатах. Внедрение данного метода позволило значительно снизить затраты на содержание дорог, повысить срок службы покрытий и адаптировать конструкции к изменениям климата. Масштабные исследования по внедрению данного руководства проводила и Канада [10].

Практическое применение методики MEPDG в США демонстрирует её высокую эффективность. Одним из ярких примеров является проект реконструкции трассы I-710 в штате Калифорния. Применение механико-эмпирических методов позволило не только значительно сократить затраты на содержание дорожного покрытия, но и повысить точность прогнозирования срока его службы. Это было достигнуто благодаря учету динамических нагрузок, специфических климатических условий и регулярной калибровке расчетной модели по фактическим данным мониторинга дорожного покрытия.

Аналогичный положительный опыт был отмечен в штатах Техас и Флорида, где использование MEPDG позволило оптимизировать проектные решения с учетом региональных особенностей, таких как высокая температура воздуха, интенсивные осадки и сложный состав транспортного потока. В Техасе на примере проекта реконструкции автомагистрали US-290

было показано, что применение методики MEPDG позволяет на 20% снизить общие эксплуатационные расходы за счет более точного планирования ремонтных мероприятий и продления межремонтных сроков службы дорожного покрытия.

В Австралии метод тестировался на магистралях, проходящих через регионы с высокими температурами и песчаными почвами. Результаты подтвердили, что точность прогнозов MEPDG выше, чем у традиционных эмпирических методов, однако для полного внедрения потребовалась дополнительная калибровка модели.

В Европе, включая Германию и Францию, MEPDG применяется точно и требует адаптации к местным материалам и интенсивности движения.

На практике методология MEPDG широко используется в США и других странах благодаря высокой точности и адаптивности. Однако при попытках её применения в России возникают сложности, связанные с необходимостью локальной калибровки модели, адаптации к специфике дорожных конструкций и климатическим условиям.

На сегодняшний день основным нормативным документом в области проектирования нежестких дорожных одежд является ГОСТ Р 71404-2024.

ГОСТ Р 71404-2024 представляет собой важное обновление российской нормативной базы в области проектирования дорожных одежд и включает в себя методику по расчету дорожных одежд на прочность, морозоустойчивость и осушение, однако проверка на устойчивость к колееобразованию носит лишь рекомендательный характер.

Современные отечественные методы прогнозирования колеи ориентированы на использование программных комплексов, таких как РАДОН (Россия) и ПЛАКАР (Россия), адаптированных под российские климатические зоны. Однако, несмотря на внедрение новых алгоритмов

расчёта остаточных пластических деформаций, существует необходимость дальнейшей калибровки расчётных моделей на основе полевых данных, особенно в условиях регионов с экстремальными температурами и высокой интенсивностью грузового транспорта.

Таблица 2

Сравнение точности, применимости и сложности прогнозных моделей

Критерий	Отечественные модели	MEPDG (США)
Точность прогнозов	Средняя, зависит от калибровки для разных климатических зон	Высокая, благодаря динамической калибровке
Применимость	Подходит для стандартных дорожных конструкций в РФ, ограничен региональной адаптацией	Высокая применимость благодаря возможности региональной калибровки и адаптации
Сложность расчётов	Средняя, возможно применение без сложного ПО	Высокая, требует большого объёма данных и мощных вычислительных ресурсов
Гибкость модели	Ограниченная, фиксированные нормативные параметры	Высокая, региональная адаптация за счёт калибровочных коэффициентов
Детализация данных	Ориентирован на усреднённые значения	Высокая детализация, учитывает многослойную структуру дорожной одежды
Учёт климатических факторов	Делит территорию РФ на климатические зоны, использует усреднённые показатели	Учитывает реальные метеоданные и сезонные изменения

Отечественным нормативным документом, содержащим эмпирическую методику прогнозирования колееобразования, является ОДМ 218.2.096-2018.

В основу этого подхода лег семилетний мониторинг состояния покрытия автомобильной дороги Р22 «Каспий».

Рассмотренные методы прогнозирования колееобразования различаются по точности расчётов, сложности их проведения и применимости к различным условиям эксплуатации. Для оценки этих аспектов представим сравнительный анализ в таблице 2.

Таким образом, МЕРPDG демонстрирует более высокую точность прогнозов за счёт детализированного подхода и адаптивной системы расчётов. Однако сложность его применения выше из-за необходимости большого количества входных данных и калибровки. Отечественные методики, напротив, проще в расчётах, но требуют уточнения коэффициентов для различных условий эксплуатации.

Литература

1. Elshamy M.M.M, Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Vol. 1614(1):012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012099.
2. Ковалев Д.И, Шайхутдинова Р.А. Проблемы колееобразования на автомобильных дорогах // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2022, №1, Том 9 URL: t-s.today/PDF/10SATs122.pdf. DOI: 10.15862/10SATs122.
3. Быков А.Д., Щеголева Н.В. Современные методы борьбы с колееобразованием асфальтобетонных покрытий // Техническое регулирование в транспортном строительстве, 2024, №2(65). URL: trts.esrae.ru/94-679
4. Ярышкин И.А., Карпов И.А. Проблема колееобразования на автомобильных дорогах и способы ее решения // Перспективы современного

строительства: Сборник статей участников II Национальной (всероссийской) научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 2024, С. 590-603.

5. Тиратурян А. Н., Симакова А.А., Бодров И.В., Фарниева М.В. Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509.

6. Тиратурян А.Н., Белоусов Е.С., Шаталов В.Ю. Имитационное моделирование ухудшения эксплуатационного состояния нежестких дорожных конструкций на основе вероятностного подхода // Инженерный вестник Дона, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3710.

7. Конорева О.В., Муравьев Ю.А. Анализ современных методов повышения устойчивости асфальтобетонных покрытий к колееобразованию // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3802.

8. Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice. AASHTO, Washington, D.C., 2008. 204pp. ISBN: 978-1-56051-423-7.

9. Мерзликин А.Е. О прогнозировании колеи, обусловленной накоплением деформаций асфальтобетонного покрытия (на основании нового метода расчета дорожных одежд США) // Дороги и мосты. М.; РосдорНИИ; 2016, Вып. 36/2, С. 175-180 (RU-ToGUA 625.7/.8 Д691 ru.

10. Saha J., Nassiri S., Bayat A., Soleymani H. Evaluation of the effects of Canadian climate conditions on the MEPDG predictions for flexible pavement performance // International Journal of Pavement Engineering, DOI:10.1080/10298436.2012.752488

References

1. Elshamy M.M.M, Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, Vol. 1614(1):012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012099.
2. Kovalev D. I., Shajhutdinova R. A. Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya», 2022, № 1, Vol. 9. URL: t-s.today/PDF/10SATS122.pdf. DOI: 10.15862/10SATS122.
3. Bykov A.D., Shchegoleva N.V. Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve, 2024, №2(65). URL: trts.esrae.ru/94-679.
4. Yaryshkin I.A., Karpov I.A. Perspektivy sovremennogo stroitel'stva: Sbornik statei uchastnikov II Natsional'noi (vserossiiskoi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 2024, pp. 590-603.
5. Tiraturyan A. N., Simakova A.A., Bodrov I.V., Farnieva M.V. Inženernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509.
6. Tiraturyan A. N., Belousov E. S., Shatalov V. Ju. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3710.
7. Konoreva O. V., Murav'ev Ju. A. Inzhenernyj vestnik Dona , 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3802.
8. Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice. AASHTO, Washington, D.C., 2008, 204 p. ISBN: 978-1-56051-423-7.
9. Merzlikin A. E. Dorogi i mosty, 2016, №2. URL: rosdornii.ru/dim/36-vypusk.
10. Saha J., Nassiri S., Bayat A., Soleymani H. International Journal of Pavement Engineering, DOI:10.1080/10298436.2012.752488.

Дата поступления: 17.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025
