

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].

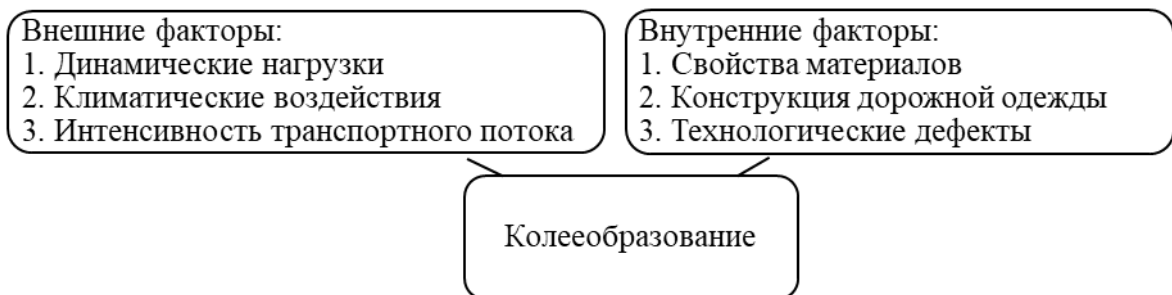


Рис. 1. Факторы, влияющие на интенсивность колееобразования

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 требует 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 колееобразования, 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
