

Прогнозирование колееобразования на поверхности дорожных одежд на основе механико-эмпирического метода

А.А. Бобкин, А.Н. Тиратурян

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

Аннотация: В статье рассматривается применение механико-эмпирического метода проектирования дорожных покрытий для прогнозирования колееобразования на поверхности дорожных конструкций. Возникновение колеи является одним из наиболее распространенных видов дефектов дорожных покрытий, значительно снижающим безопасность и комфорт движения. В качестве инструмента для оценки устойчивости дорожной конструкции к накоплению пластических деформаций в данной работе использованы расчетные модели механико-эмпирического руководства по проектированию покрытий (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), которые учитывают такие факторы, как интенсивность и осевая нагрузка транспорта, климатические условия, физико-механические свойства материалов покрытия. Приведен пример прогнозирования глубины колеи, рассмотренным методом.

Ключевые слова: колееобразование, механико-эмпирический метод, дорожные покрытия, прогнозирование, механико-эмпирическое руководство по проектированию покрытий, транспортные нагрузки, климатические условия.

Одним из наиболее часто возникающих видов дефектов покрытий является колея, которая возникает под воздействием многократно повторяющихся транспортных нагрузок и неблагоприятных климатических условий, а непрерывно растущие интенсивность движения и осевые нагрузки значительно ускоряют процесс ее накопления [1]. Появление на покрытии необратимых пластических деформаций в виде колеи приводит к потере продольной ровности покрытия, снижению качества дорожного полотна, увеличению эксплуатационных расходов, снижению безопасности и ухудшению условий движения, росту динамических нагрузок от автомобилей и более интенсивному развитию разрушений покрытия [2,3].

Активное накопление колеи на дорожном покрытии объясняется целым рядом факторов, среди которых использование дорожно-строительных материалов низкого качества и отклонения от утверждённых технологий при выполнении строительных работ [4]. Немаловажным фактором является также несовершенство существующих методических подходов к расчёту и

проектированию конструкций дорожных одежд [5,6]. В условиях растущих нагрузок на автодороги, обеспечение долговечности и эксплуатационной надёжности дорожных конструкций приобретает первостепенное значение. Таким образом особое значение сегодня имеет совершенствование методов прогнозирования и эффективного предотвращения колееобразования [7,8]. Повышенное внимание изучению данной проблемы уделяют отечественные и зарубежные исследователи, постоянно разрабатывая и внедряя новые подходы и решения в области проектирования дорог [9].

В США было разработано механико-эмпирическое руководство по проектированию дорожных покрытий (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG) [10], призванное оптимизировать дорожную конструкцию и обеспечить развитие дефектов в пределах допустимых значений. Данное руководство представляет собой один из наиболее современных подходов к прогнозированию долговечности дорожных одежд. Его основная концепция заключается в сочетании механических моделей, описывающих поведение материалов дорожных конструкций под нагрузкой, и эмпирических зависимостей, полученных на основе многолетних полевых наблюдений и лабораторных испытаний. Данный подход позволяет обеспечить более точное прогнозирование параметров эксплуатации дорожного покрытия на протяжении всего срока его службы. Сегодня MEPDG активно применяется в США.

Проектирование дорожных одежд по MEPDG состоит из трех основных этапов:

1. Определение исходных данных;
2. Структурный анализ и прогнозирование выбранных параметров, а также внесение корректировок и перерасчет конструкций при превышении допустимых значений;

3 Сравнение и анализ конструкций, удовлетворяющих всем требованиям.

Исходные параметры для реализации механико-эмпирического метода проектирования дорожных покрытий (MEPDG) следующие:

- физические и механические свойства используемых дорожно-строительных материалов покрытия и основания;
- интенсивность транспортных потоков, включая распределение по величине и частоте осевых нагрузок;
- климатические характеристики региона, отражающие сезонные колебания температуры, показатели влажности и другие погодные факторы;
- конструктивные особенности дорожной одежды, к которым относятся толщина конструктивных слоёв и свойства материалов основания и верхних слоёв покрытия.

Заложенные в основу механико-эмпирические принципы позволяют рассчитать реакцию дорожного покрытия и предсказывать накапливающиеся со временем дефекты.

Одним из критериев расчета покрытия по методике в представленном руководстве стал расчет глубины колеи, связанный с накоплением пластических деформаций как в слоях асфальтобетона, так и в слоях из несвязных материалов и земляном полотне. MEPDG позволяет прогнозировать этот показатель с учетом широкого спектра факторов, включая транспортные нагрузки, климатические условия и свойства материалов.

Для реализации данного подхода необходимо разделить расчетный срок службы дорожной одежды на периоды. Параметры транспортного потока каждого периода принимаются постоянными величинами. Также поступают с температурой и влажностью (климатическими факторами). Конструкцию дорожной одежды разбивают на отдельные подслои.

Накопленная колея за расчетный период будет определяться как суммарное значение пластических деформаций подслоев, которые рассчитываются в середине каждого подслоя в каждый временной период.

В соответствии с методикой MEPDG расчет остаточных деформаций в асфальтобетонных слоях дорожной конструкции выполняется с учетом величины относительной остаточной деформации в центральной точке каждого подслоя. Данная величина (формула 1) рассчитывается на основе теории упругости, учитывающей глубину расположения подслоя, толщину конструктивных слоев и свойства материалов, а также условия эксплуатации, такие как температура слоя и общее число циклов нагружения [9]:

$$\varepsilon_{p(HMA)} = \varepsilon_{r(HMA)} \cdot k_1 \cdot 10^{-3.35412} \cdot n^{0.4791} \cdot T^{1.5606}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{p(HMA)}$ – относительная остаточная деформация, определенная в середине каждого подслоя;

$\varepsilon_{r(HMA)}$ – относительная упругая деформация, вычисленная по теории упругости в середине каждого подслоя;

k_1 – коэффициент ограничения по глубине;

n – количество приложений расчетной нагрузки;

T – температура покрытия, °F.

$$k_1 = (C_1 + C_2 \cdot D) \cdot 0,328196^D,$$

где

$$C_1 = -0,1039H_{HMA}^2 + 2,4868H_{HMA} - 17,342;$$

$$C_2 = -0,0172H_{HMA}^2 - 1,7331H_{HMA} + 27,428;$$

D – глубина от поверхности покрытия, дюйм;

H_{HMA} – толщина пакета асфальтобетона, дюйм.

Относительные остаточные деформации, полученные для каждого подслоя, умножают на соответствующие толщины этих подслоев и суммируют. Результат этого сложения представляет собой накопленную пластическую деформацию.

$$\Delta_{p(HMA)} = \sum \varepsilon_{p(HMA)} \cdot h_{HMA},$$

где h_{HMA} - толщина подслоя асфальтобетона, дюйм.

В работе выполнено прогнозирование колееобразования для двух различных вариантов конструкции дорожной одежды. Первый вариант принят в соответствии с примером расчета таблицы Ж.3, ГОСТ Р 71404. Второй вариант разработан на основе технических требований ГОСТ Р 71404, но с значительным облегчением конструкции. Прогноз выполнялся для условий эксплуатационной температуры покрытия, равной 40°C, и при количестве приложений расчетной нагрузки, равном 1 млн циклов.

Для первого варианта дорожной конструкции был выполнен расчёт в нескольких различных конфигурациях разбиения слоёв на подслои: первый случай предусматривал деление верхнего слоя покрытия (ВСП) на 4 подслоя, нижнего слоя покрытия (НСП) на 4 подслоя и верхнего слоя основания (ВСО) на 8 подслоев. Второй вариант предполагает деление дорожной конструкции на 2 подслоя ВСП, 2 подслоя НСП и 4 подслоя ВСО. В третьем варианте структура была упрощена до 1 подслоя в ВСП, 1 подслоя в НСП и 2 подслоев в ВСО. В четвертом варианте будем считать, что каждый слой (ВСП, НСП и ВСО) представлен одним подслоем. Результат расчета представлен на рис. 1.

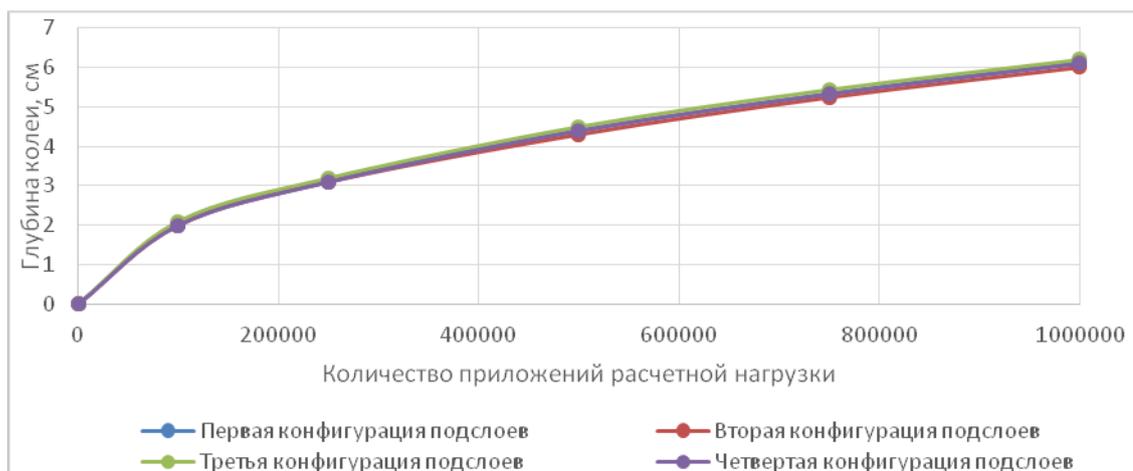


Рис 1. Прогнозирование образования колеи для первого варианта дорожной конструкции

Для второго варианта конструкции также выполнен ряд расчётов с разным уровнем детализации слоёв. В первом случае верхний слой покрытия был разделён на 6 подслоев, а нижний слой – на 8 подслоев. Во втором случае количество подслоев составило 3 для ВСП и 4 для НСП, в третьем – по 2 подслоя для каждого слоя покрытия (ВСП и НСП), и в последнем – по одному подслою для верхнего и нижнего слоёв покрытия. Результат расчета представлен на рис. 2.

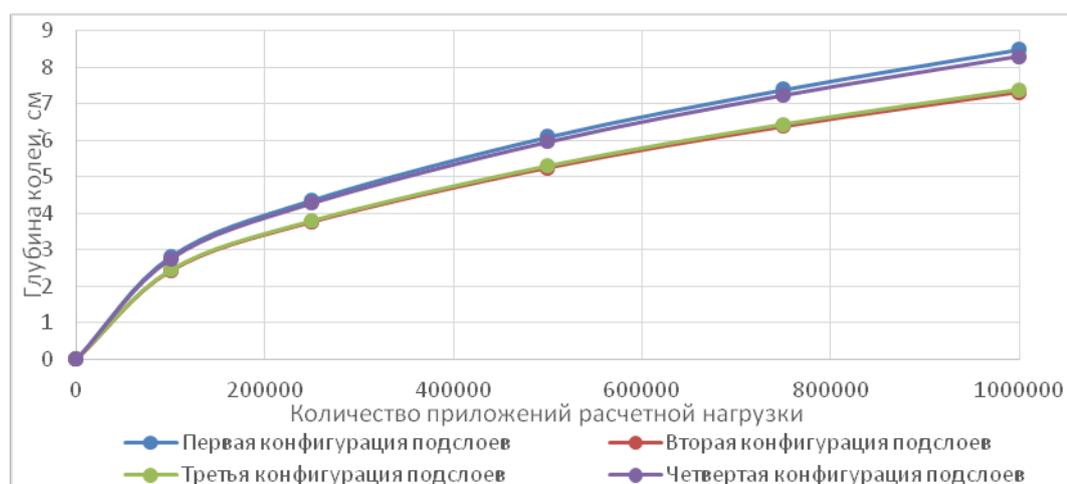


Рис 2. Прогнозирование образования колеи для второго варианта дорожной конструкции

Анализ результатов проведенных расчётов показывает, что снижение общей жёсткости и капитальности конструкции дорожной одежды приводит к существенному увеличению диапазона прогнозируемых значений пластических деформаций. Таким образом, при упрощении структуры дорожного покрытия неопределённость в прогнозируемой глубине колеи возрастает, что требует тщательного подхода к выбору конструктивных решений при проектировании.

Литература

1. Угланов Ю.А. Обследование автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием, подверженных образованию колеи // Техническое регулирование в транспортном строительстве, 2024, № 1. URL: trts.esrae.ru/93-675.

2. Ярышкин И.А., Симановский А.М. Проблемы колееобразования и методы борьбы с ними на автомобильных дорогах с асфальтобетонным покрытием // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры, 2022. – С. 121-125.

3. Меджидов Р.А., Магомедов М. С. М. Колееобразование на автомобильных дорогах. Причины и пути решения проблемы // Приоритеты развития автотранспортного и дорожного комплекса, 2021. – С. 43-46.

4. Бахрах Г.С. Оценка сопротивления асфальтобетона пластическому колееобразованию // Дороги и мосты, 2019, № 1. URL: rosdornii.ru/documents/sbornik-dorogi-i-mosty/archive/41-vypusk.

5. 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.

6. Давыдов А.Н. Исследование математической модели формы колееобразования на автомобильных дорогах // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре, 2019, С. 266-273.

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. 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.

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

References

1. Uglanov Yu.A. Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve, 2024, № 1 URL: trts.esrae.ru/93-675.

2. Yaryshkin I.A., Simanovskii A.M. Innovatsii i dolgovechnost' ob"ektov transportnoi infrastruktury, 2022, pp. 121-125.

3. Medzhidov R.A., Magomedov M. S. M. Prioritety razvitiya avtotransportnogo i dorozhnogo kompleksa, 2021, pp. 43-46.

4. Bakhrakh G.S. Dorogi i mosty, 2019, № 1. URL: rosdornii.ru/documents/sbornik-dorogi-i-mosty/archive/41-vypusk/.



5. 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.

6. Davydov A.N. Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture, 2019, pp. 266-273.

7. Konoreva O. V., Murav'ev Ju. A. Inženernyj vestnik Dona , 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3802.

8. Tiraturyan A. N., Belousov E. S., Shatalov V. Yu. Inzhenernyi vestnik Dona, 2016, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3710.

9. Merzlikin A. E. Dorogi i mosty, 2016, №2 URL: rosdornii.ru/dim/36-vypusk.

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

Дата поступления: 17.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025