

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-4>

Стойкость асфальтобетонов к образованию пластической колеи в зависимости от сдвиговой устойчивости вяжущих материалов



Юрий ЦИБАРИУС



Алексей ЛАНИС



Алексей БЕРДЮГИН



Максим РАЗУВАЕВ

*Юрий Александрович Цибариус¹, Алексей Леонидович Ланис²,
Алексей Николаевич Бердюгин³, Максим Алексеевич Разуваев⁴*

^{1, 2, 3, 4}Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.

¹ORCID 0009-0002-4398-3492; РИНЦ AuthorID 1234849.

²ORCID 0000-0001-5353-1030; Scopus AuthorID 57204686306; РИНЦ AuthorID 651559.

³ORCID: 0009-0009-7834-3576; РИНЦ SPIN-код: 9725–3756; РИНЦ AuthorID: 1234837.

⁴ORCID: 0009-0003-0015-558X.

✉ ¹ yustu@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

В работе обоснована актуальность исследования процесса пластического колееобразования на автомобильных дорогах с асфальтобетонными покрытиями. Выдвинута гипотеза о том, что существующий подход к контролю качественных показателей на этапе выпуска асфальтобетонных смесей, в том числе входящих в ее состав компонентов, а именно контроль требуемой стойкости к пластическому колееобразованию получаемых асфальтобетонных покрытий, имеет существенный недостаток. Обозначенный недостаток заключается в том, что оценка возможности использования конкретной партии вяжущего материала для приготовления асфальтобетонной смеси в настоящее время осуществляется только на основании входного контроля качества данного материала, путем сопоставления полученных в лаборатории фактических значений физико-механических характеристик с минимальными нормативными значениями, установ-

ленными для принятой в проектной документации марки вяжущего материала, без учета фактических значений качественных характеристик вяжущего материала, использованного на этапе лабораторного подбора состава. Данный недостаток, в ряде случаев, может привести к необеспечению стойкости асфальтобетонной смеси к пластическому колееобразованию на этапе ее выпуска.

Приведены результаты испытаний сдвиговой устойчивости партий вяжущих материалов одной марки и стойкости асфальтобетонов, приготовленных с использованием данных вяжущих материалов, к пластическому колееобразованию. По результатам исследования подтверждена выдвинутая авторами гипотеза, в том числе получена и статистически обоснована зависимость показателя «средняя глубина колеи» от сдвиговой устойчивости вяжущего материала, состаренного по методу RTFOT.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, асфальтобетон, вяжущие материалы, пластическая колея, сдвиговая устойчивость, стойкость к колееобразованию, средняя глубина колеи.

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда и Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа (проект № 24–19–20036).

Для цитирования: Цибариус Ю. А., Ланис А. Л., Бердюгин А. Н., Разуваев М. А. Стойкость асфальтобетонов к образованию пластической колеи в зависимости от сдвиговой устойчивости вяжущих материалов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 2 (111). С. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-4>.

**Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных нормативных требований, предъявляемых к эксплуатационному состоянию автомобильных дорог по условиям обеспечения безопасности дорожного движения, является ограничение максимальной глубины колеи на покрытиях. При этом, в настоящее время, до 35 % всех выявляемых случаев ненормативного транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог обусловлено наличием колеи на покрытиях с глубиной, превышающей установленные максимальные значения [1].

Появление колеи на асфальтобетонных покрытиях обусловлено как пластическими деформациями материала покрытия (пластическая колея), так и истиранием материала покрытия (абразивная колея). Пластическая колея, в свою очередь, может быть как поверхностной, связанной с несоответствием фактической сдвигоустойчивости материала слоя покрытия (асфальтобетона) конкретным условиям эксплуатации, так и глубинной, появление которой вызвано сдвиговыми деформациями нижележащих слоев дорожной одежды и земляного полотна [1–3]. В настоящем исследовании рассматривается пластическая поверхностная колея, визуально отличающаяся по наличию гребней выпора [1] – боковых выпоров асфальтобетона по границам полос наката (рис. 1).

Поверхностная пластическая колея на асфальтобетонных покрытиях образовывается в наиболее жаркое время года и имеет, в основном, накопительный эффект – формируется под воздействием нагрузки от проходящих транспортных средств. В соответствии с действующей нормативной документацией стойкость асфальтобетонов к образованию

колеи данного вида оценивается по значениям показателя «средняя глубина колеи», получаемых при проведении соответствующих испытаний в лабораторных условиях. Сущность метода заключается в циклическом воздействии нагрузки (20000 проходов нагруженного колеса) на контрольный образец асфальтобетона при заданной температуре с последующим определением средней глубины колеи по результатам двух параллельных испытаний [4].

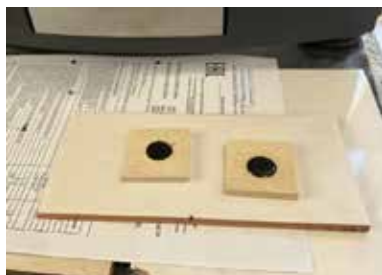
Целевые значения показателя «средняя глубина колеи» установлены в нормативной документации для асфальтобетонных смесей различных типов в зависимости от условий эксплуатации конкретных участков автомобильных дорог. Достижение данных целевых показателей в лабораторных условиях является обязательным для утверждения состава асфальтобетонной смеси в производство работ. Дополнительно предусмотрен контроль качества асфальтобетонной смеси по данному параметру на этапе ее выпуска с периодичностью 1 раз в 15 суток.

Факт существенного влияния свойств вяжущего материала, входящего в состав асфальтобетонных смесей, на свойства асфальтобетонов, в том числе на устойчивость к образованию пластической колеи, отмечен в работах многих авторов [1; 3; 5–15]. Оценка возможности использования конкретной партии вяжущего материала для приготовления асфальтобетонной смеси в настоящее время осуществляется на основании входного контроля качества данного материала, путем сопоставления полученных в лаборатории фактических значений физико-механических характеристик с минимальными нормативными значениями, установленными



Рис. 1. Гребень выпора на асфальтобетонном покрытии с поверхностной пластической колеей [фотоматериал авторов].





а)



б)

Рис. 2. Подготовка контрольных образцов-плит (а) с испытанием на динамическом сдвиговом реометре (б) [фотоматериалы авторов].

для принятой в проектной документации марки вяжущего материала, без учета фактических значений качественных характеристик вяжущего материала, использованного на этапе лабораторного подбора состава. Реализация данного подхода, заключающегося только в подтверждении требуемой марки вяжущего материала при оценке возможности его использования, без учета фактических значений его характеристик, может привести к необеспечению стойкости асфальтобетонной смеси к пластическому колееобразованию на этапе ее выпуска.

Для проверки данной гипотезы и разработки нового подхода к оценке возможности применения поступающих на производство партий вяжущих материалов авторами были проведены исследования, направленные на выявление зависимости стойкости асфальтобетонов к образованию пластической колеи от свойств вяжущих материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметрами, характеризующими эффективность работы вяжущего материала при положительных температурах, является сдвиговая устойчивость исходного вяжущего и сдвиговая устойчивость вяжущего, состаренного по методу *RTFOT*. Метод *RTFOT* позволяет оценить изменения свойств вяжущего материала (в нормативной документации принят термин «старение»), происходящие в процессе приготовления горячих асфальтобетонных смесей.

В лаборатории проведены исследования образцов вяжущих материалов марки *PG 64-40* четырех производителей – далее образцы № 1 – № 4. Выбор марки битумного вяжущего обусловлен климатическими условиями эксплуатации автомобильных дорог на территории Новосибирской области.

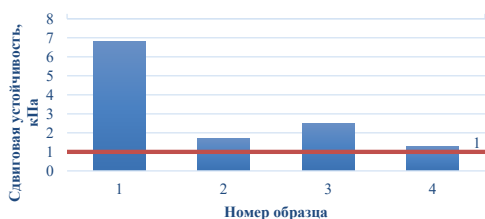
Для определения величины сдвиговой устойчивости битумного вяжущего в соответствии с нормативной методикой из каждого вяжущего материала изготовлены контрольные образцы диаметром 25 мм (рис. 2 а) с их последующим испытанием на динамическом сдвиговом реометре (рис. 2 б).

Результаты испытаний сдвиговой устойчивости исходного вяжущего и сдвиговой устойчивости вяжущего, состаренного по методу *RTFOT*, для всех образцов представлены на рис. 3. Уровень горизонтальной красной линии на рис. 3 соответствует требованиям, предъявляемым к значениям сдвиговой устойчивости вяжущего материала марки *PG 64-Y* при температуре испытания 64°C.

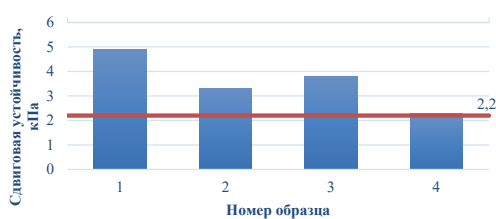
Полученные результаты подтверждают, что все испытанные вяжущие материалы соответствуют требованиям, предъявляемым к марке *PG 64-Y*, при этом для испытанных образцов значения сдвиговой устойчивости исходного вяжущего различаются более чем в 5 раз, а значения сдвиговой устойчивости вяжущего, состаренного по методу *RTFOT*, – более чем в 2 раза.

Для определения влияния сдвиговой устойчивости битумного вяжущего на образование пластической колеи в качестве исследуемой была выбрана щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь *SMA-16*, используемая на территории Новосибирской области, состав которой, приведенный в табл. 1, был подобран авторами в рамках выполнения работ по строительному контролю объектов дорожного строительства.

На этапе подбора указанного состава в лабораторных условиях было получено значение показателя «средней глубины колеи» 3,30 мм при значениях сдвиговой устойчивости использованного битумного вяжущего *PG 64-40* при температуре испытания 64°C: ис-



а)



б)

Рис. 3. Результаты испытаний сдвиговой устойчивости исходного вяжущего (а) и вяжущего, состаренного по методу RTFOT (б), при температуре испытания 64°С [выполнено авторами].



а)



б)

Рис. 4. Подготовка контрольных образцов-плит (а) с испытанием на установке прокатывания нагруженного колеса (б) [фотоматериалы авторов].

ходного – 1,3 кПа; состаренного по методу RTFOT – 3,0 кПа.

В рамках настоящего исследования в лабораторных условиях подготовлены четыре пробы щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси SMA-16 с использованием исследованных ранее вяжущих материалов марки PG 64-40.

Для определения значений показателя «средней глубины колеи» из каждой подготовленной пробы щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси SMA-16 на секторном уплотнителе приготовлены контрольные образцы-плиты (рис. 4 а) с их последующим испытанием на установке прокатывания нагруженного колеса (рис. 4 б).

Результаты определения значений показателя «средняя глубина колеи», полученные на этапе подбора состава и этапе проведения данного исследования, приведены в табл. 2.

Анализируя результаты проведенных испытаний, следует отметить, что для образца № 4, соответствующего марке вяжущего PG 64-40 по показателям сдвиговой устойчивости, получено значение показателя «сред-

Таблица 1
Состав смеси SMA-16
[выполнено авторами]

Наименование материала		Содержание в смеси, %
Минеральная часть смеси по фракциям	фр. 0–4 мм	16,5
	фр. 4–11,2 мм	44,3
	фр. 11,2–16,0 мм	25,1
	Мин. порошок МП-1	8,5
Стабилизирующая добавка СД-3		0,4 (в 100 %)
Органическое вяжущее PG 64-40		5,2 (в 100 %)

няя глубина колеи», не соответствующее требованию нормативной документации, установленному для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси SMA-16 – не более 3,5 мм. Данный факт подтверждает корректность выдвинутой авторами гипотезы.

Для разработки нового подхода к оценке возможности применения поступающих на производство партий вяжущих материалов авторами проведен регрессионный анализ



Таблица 2

Результаты определения значений показателя «средняя глубина колеи»
[выполнено авторами]

Параметр	Ед. изм.	Значение параметра				
		на этапе подбора состава смеси	для образца №			
			1	2	3	4
Средняя глубина колеи	мм	3,30	1,93	3,03	2,96	4,62

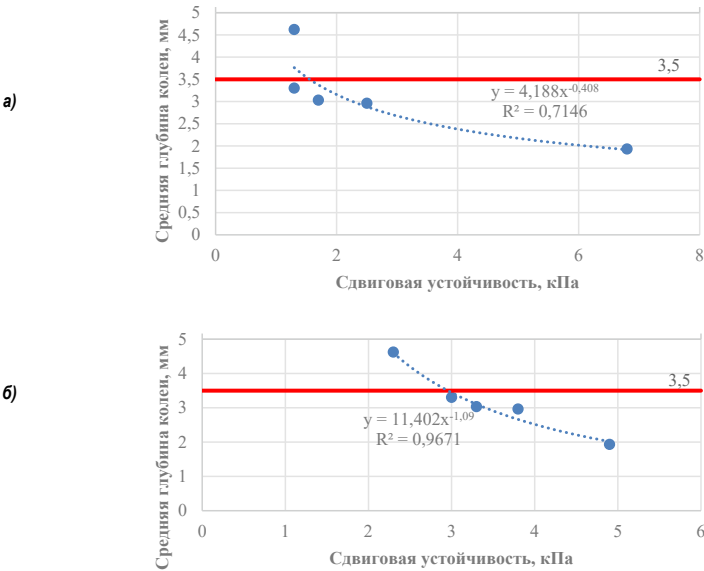


Рис. 5. Зависимость значения показателя «средняя глубина колеи» от сдвиговой устойчивости исходного вяжущего (а) и вяжущего, состаренного по методу RTFOT (б) [выполнено авторами].

Таблица 3

Результаты проверки значимости зависимостей по F-критерию
[выполнено авторами]

№ зависимости	n	m	R ²	F _{факт}	F _{табл}	
					α = 0,05	α = 0,01
1	5	1	0,7146	7,51	10,13	34,12
2	5	1	0,9671	88,19	10,13	34,12

полученных данных, по результатам которого установлены функциональные зависимости значения показателя «средняя глубина колеи» от значения сдвиговой устойчивости вяжущего для асфальтобетонной смеси SMA-16 исследуемого состава (рис. 5).

Полученные зависимости имеют следующий вид:

$RD = 4,188 \cdot \left(\frac{G^*}{\sin \delta}\right)^{-0,408},$ (1)

$RD = 11,402 \cdot \left(\frac{G^*}{\sin \delta}\right)^{-1,09},$ (2)

где RD – средняя глубина колеи, мм;

G* – комплексный модуль сдвига, кПа;

δ – фазовый угол, рад;

G*/δ – сдвиговая устойчивость исходного вяжущего (1) или вяжущего, состаренного по методу RTFOT (2), кПа.

Результаты проверки значимости полученных зависимостей (уравнений регрессии) по критерию Фишера (F-критерию) приведены в табл. 3.

Данные, представленные в табл. 3, подтверждают возможность использования зависимости (2) при расчете прогнозируемых значений показателя «средняя глубина колеи» через значения сдвиговой устойчивости вяжущих материалов, состаренных по методу RTFOT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований авторами подтверждена гипотеза о наличии существенного недостатка в существующем подходе к выпуску асфальтобетонных смесей, заключающегося только в подтверждении требуемой марки вяжущего материала при оценке возможности его использования, без учета фактических значений его характеристик. Показано, что данный недостаток в ряде случаев может привести к необеспечению стойкости асфальтобетонной смеси к пластическому колееобразованию. Установлена взаимосвязь стойкости асфальтобетонов к образованию пластической колеи и сдвиговой устойчивости вяжущих материалов, входящих в состав асфальтобетонов, получена функциональная зависимость значения показателя «средняя глубина колеи» от значения показателя сдвиговой устойчивости вяжущего, состаренного по методу *RTFOT*, для асфальтобетонной смеси *SMA-16* исследуемого состава. Использование данной функциональной зависимости позволит определять прогнозную величину показателя «средняя глубина колеи» на этапе входного контроля вяжущих материалов, что даст возможность существенно снизить вероятность выпуска асфальтобетонной смеси, не соответствующей требованиям нормативной документации по стойкости к образованию поверхностной пластической колеи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Конорева О. В., Муравьев Ю. А. Анализ современных методов повышения устойчивости асфальтобетонных покрытий к колееобразованию // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43). – С. 136. EDN: VYBWGL.
2. Mijoski, G. Rut appearance on pavement surface and measurements on motorway A-4 in Macedonia. International Scientific Conference. People, Buildings and Environment. Kromeriz, Czech Republic, 2014, pp. 296–305.
3. Костельнов М. П., Перевалов В. П., Пахаренко Д. В. Практика борьбы с колеей асфальтобетон-

ных покрытий может быть успешной // Дорожная техника. – 2011. – № 2. – С. 54–70.

4. Симчук Е. Н., Жданов К. А., Дедковский И. А. Совершенствование подходов и методов оценки физических и эксплуатационных свойств дорожного асфальтобетона в России // Дороги и мосты. – 2021. – № 1 (45). – С. 181–221. EDN: NLXXIP.

5. Ziari, H., Shirini, B., Imaninasab, R. Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. Engineering Solid Mechanics, 2015, Vol. 3, Iss. 4, pp. 253–262. DOI: 10.5267/j.esm.2015.6.001.

6. Xiongwei, D., Yanshun, J., Shaoquan, W., Ying, G. Evaluation of the Rutting Performance of the Field Specimen Using the Hamburg Wheel-Tracking Test and Dynamic Modulus. Advances in Civil Engineering, 2020, Iss. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2020/9525179.

7. Левкович Т. И., Беляков А. И., Билько А. Е. [и др.]. О модификации битумов и асфальтобетонных смесей для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Приволжский научный вестник. – 2016. – № 1 (53). – С. 48–53. EDN: VJLTHR.

8. Кирюхин Г. Н. Сдвигоустойчивость щебеночно-мастичного асфальтобетона // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – № 40. – С. 76–79. EDN: NUZDXF.

9. Чернов С. А., Чирва Д. В., Леконцев Е. В. Влияние полимерно-битумного вяжущего на процессы колееобразования в верхних слоях покрытий автомобильных дорог // Наукоедение. – 2012. – № 4 (13). EDN: PVXHPX.

10. Чернов С. А., Каклюгин А. В., Никитина А. Н., Голубин К. Д. Влияние полимерно-дисперсно-армирующей добавки на эксплуатационные свойства асфальтобетона // Вестник МГСУ. – 2017. – Вып. 12. – № 6 (105). – С. 654–660. EDN: ZASZGZ.

11. Котенко Н. П., Щерба Ю. С., Евфорицкий А. С. Влияние полимерных и функциональных добавок на свойства битума и асфальтобетона // Пластические массы. – 2019. – № 11–12. – С. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-47-49>.

12. Прибылов В. С., Пичугин А. П. Долговечность асфальтобетона на сталепластинных шлаках с модифицированным нанодобавками битумом // Известия вузов, Строительство. – 2023. – № 4 (772). – С. 14–23. EDN: CDUCAG.

13. Ерофеев В. Т., Сальникова А. И. Исследование реологических свойств модифицированного битума // Вестник МГСУ. – 2016. – № 8. – С. 48–63. EDN: WIQROR.

14. Беляев П. С., Полушкин Д. Л., Макеев П. В. [и др.]. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник ТГТУ. – 2016. – № 2. – С. 264–271. EDN: VWDSXH.

15. Дубина С. И. Надежность асфальтобетонных покрытий автомобильных магистралей // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 3 (3). – С. 60–63. EDN: JXCMDP.

Информация об авторах:

Цибариус Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, yustu@yandex.ru.

Ланис Алексей Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, lanisal@stu.ru.

Бердюгин Алексей Николаевич – аспирант, ведущий инженер по надзору за строительством Научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения Новосибирск, Россия, 2438988@mail.ru.

Разуваев Максим Алексеевич – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, sen@stu.ru.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024, одобрена после рецензирования 13.05.2024, принята к публикации 16.05.2024.

