

Научная статья  
УДК 625.855.3

### Влияние проницаемости на уплотнение асфальтобетонных покрытий

Сергей Аркадьевич Павлов<sup>1</sup>, Евгений Дмитриевич Тимофеев<sup>2</sup>,  
Илья Дурманов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>1</sup>blp1stw@ya.ru

<sup>2</sup>EvgenyTimofeev2857@yandex.ru

<sup>3</sup>10durmanov@mail.ru

**Аннотация.** Свойство проницаемости асфальтобетонных покрытий является недостаточно изученным, однако последние исследования в области строительства дорог доказывают, что степень проявления этого свойства значительно влияет на эксплуатационную долговечность дорожных конструкций. Выполненное авторами исследование демонстрирует прямую взаимосвязь между содержанием воздушных пустот в структуре материала и степенью его уплотнения. Значительное содержание воздушных пор приводит к возрастанию проницаемости, что катализирует процессы преждевременного старения битумного вяжущего, формирование трещин и адгезионные повреждения. В статье проанализировано влияние технологических параметров уплотнения на формирование внутренней структуры асфальтобетона, дана оценка корреляции между относительной плотностью материала и его механическими характеристиками. Представлены результаты лабораторных испытаний, подтверждающие, что выбор процесса уплотнения способствует снижению проницаемости и повышению колееустойчивости покрытий. Установлены количественная зависимость между содержанием воздушных пустот и показателями трещиностойкости, морозостойкости, модулем жесткости материала.

**Ключевые слова:** проницаемость асфальтобетонного покрытия, уплотнение дорожных покрытий, воздушные пустоты, плотность асфальтобетона, колееустойчивость, долговечность покрытий, трещиностойкость

**Для цитирования:** Павлов С.А., Тимофеев Е.Д., Дурманов И. Влияние проницаемости на уплотнение асфальтобетонных покрытий // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original article

## The effect of permeability on the compaction of asphalt concrete pavements

Sergey A. Pavlov<sup>1</sup>, Evgeny D. Timofeev<sup>2</sup>, Ilya Durmanov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>1</sup>blp1stw@ya.ru

<sup>2</sup>EvgenyTimofeev2857@yandex.ru

<sup>3</sup>10durmanov@mail.ru

**Abstract.** The permeability property of asphalt concrete pavements is insufficiently studied, however, recent studies in the field of road construction prove that the degree of manifestation of this property significantly affects the operational durability of road structures. The study carried out by the authors demonstrates a direct relationship between the content of air voids in the structure of the material and the degree of its compaction. A significant content of air pores leads to an increase in permeability, which catalyzes the processes of premature aging of bitumen binders, the formation of cracks and adhesive damage. The article analyzes the influence of technological parameters of compaction on the formation of the internal structure of asphalt concrete, and estimates the correlation between the relative density of the material and its mechanical characteristics. The results of laboratory tests are presented, confirming that the choice of the sealing process helps to reduce permeability and increase the track resistance of coatings. Quantitative relationships have been established between the content of air voids and indicators of crack resistance, frost resistance, and the modulus of stiffness of the material.

**Keywords:** permeability of asphalt concrete pavement, compaction of road surfaces, air voids, density of asphalt concrete, track resistance, durability of coatings, crack resistance

**For citation:** Pavlov S.A., Timofeev E.D., Durmanov I. The effect of permeability on the compaction of asphalt concrete pavements. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 2 (48).

### Введение

Качество дорожных асфальтобетонных покрытий определяется комплексом взаимосвязанных факторов, среди которых степень уплотнения занимает приоритетное положение. Проницаемость материала, обусловленная присутствием воздушных пустот в структуре, оказывает определяющее

воздействие на эксплуатационные характеристики покрытий [3] (см. также работу А. К. Власенко<sup>1</sup>).

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий в условиях возрастающих транспортных нагрузок и неблагоприятных климатических воздействий. Современными исследованиями установлено, что увеличение содержания пустот на 1% после достижения порогового значения приводит к сокращению срока службы покрытия на 10%. Проблема недостаточного уплотнения асфальтобетонных смесей приводит к преждевременному разрушению дорожных конструкций, значительным экономическим потерям и снижению транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог [3]. Высокая проницаемость покрытий также способствует проникновению влаги в структуру материала, что катализирует множество деструктивных процессов – ускоренное старение битумного вяжущего, адгезионные повреждения, образование трещин и колея.

**Целью** настоящего исследования является установление количественных зависимостей между показателями проницаемости асфальтобетона и параметрами его уплотнения, определение рациональных диапазонов содержания воздушных пустот для различных типов смесей и условий эксплуатации.

### **Методология исследования**

Программа экспериментальных исследований основана на теориях формирования и разрушения асфальтобетонных покрытий, отражающих поведение и проявление различных физико-механических свойств асфальтобетонных смесей при механических воздействиях. В ходе исследований были изготовлены и испытаны образцы асфальтобетонных

---

<sup>1</sup>Власенко, А. К. Самовосстанавливающиеся дорожные материалы / А. К. Власенко, А. К. Краснова, К. И. Скиба // Современная наука и образование: актуальные вопросы теории и практики: сборник статей Международной научно-практической конференции в 2 частях, Пенза, 10 января 2023 г. : в 2 ч. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2023. – Ч. 1. – С. 49-51. – EDN ZQOEXL.

покрытий с разной степенью уплотнения. Объектом исследования была щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь типа ЩМА-16 на модифицированном битумном вяжущем класса PG 76-28<sup>2</sup>. Образцы были изготовлены методом гираторного уплотнения, обеспечивающего приближение к реальным условиям формирования структуры материала под воздействием дорожных катков [7]. Применение гиратора позволило минимизировать разрушение зерен каменного материала, что выгодно отличало данный метод от традиционного прессового уплотнения.

Программа эксперимента предусматривала изготовление трех серий образцов с разным числом оборотов гиратора: 25, 100 и 300 оборотов. Это позволило получить образцы с объемной плотностью в диапазоне от 2,546 до 2,669 г/см<sup>3</sup> и содержанием воздушных пустот от 2,0 до 6,4% [3]. Для каждой серии был определен комплекс физико-механических показателей: колееустойчивость методом испытания в воде при +55°C, трещиностойкость при температуре -18 °C, модуль жесткости методом непрямого растяжения при +20 °C, морозостойкость после пяти циклов попеременного замораживания и оттаивания. Температурный режим уплотнения контролировался в интервале от +140 °C до +80 °C [1].

### Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования выявили выраженную зависимость между содержанием воздушных пустот и эксплуатационными характеристиками асфальтобетонных образцов. Рассмотрим основные физико-механические показатели образцов с различной степенью уплотнения (таблица 1) [1, 3, 7].

---

<sup>2</sup>Суворова, Н. А. Щебеночно-мастичный асфальтобетон / Н. А. Суворова, Е. Н. Бурмина, Г. Т. Рыжук // XVII международная научно-практическая конференция «Наука и образование XXI века»: сборник статей конференции XVII международная научно-практическая конференция «Наука и образование XXI века», Рязань, 27 октября 2023 г. – Рязань: Современный технический университет, 2023. — С. 76-80. — EDN SZFXVF.

Таблица 1

Физико-механические показатели асфальтобетонных образцов при различной степени уплотнения

Показатель	Число оборотов гиратора, шт.		
	25	100	300
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,546	2,633	2,669
Содержание воздушных пустот, %	6,4	3,3	2,0
Колееустойчивость, глубина колеи, мм	5,9	3,4	2,6
Индекс трещиностойкости, ИТР	0,19	0,12	0,08
Модуль жесткости, МПа	2421	3535	4000
Морозостойкость, коэффициент	0,93	0,99	1,00

Анализируя данные таблицы 1, приходим к выводу, что увеличение степени уплотнения приводит к закономерному улучшению большинства эксплуатационных характеристик асфальтобетонных образцов. Наиболее выраженное влияние проницаемость оказывает на показатели колееустойчивости материала [3]. Образцы с содержанием пустот 6,4% показали глубину колеи 5,9 мм, что превышает допустимые значения для покрытий и свидетельствует о высокой вероятности формирования пластических деформаций в условиях эксплуатации. Снижение пористости до 3,3% обеспечивает уменьшение глубины колеи до 3,4 мм, а дальнейшее уплотнение до 2,0% пустот, соответственно, до 2,6 мм.

Расчет относительного улучшения колееустойчивости при снижении пористости может быть выполнен по формуле:

$$\Delta K = \frac{K^1 - K^2}{K^1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $\Delta K$  – относительное улучшение колееустойчивости, %;

$K^1$  – глубина колеи при высоком содержании пустот, мм;

$K^2$  – глубина колеи при низком содержании пустот, мм.

Подставляя экспериментальные значения, получаем:

$$\Delta K = \frac{5,9 - 2,6}{5,9} \cdot 100 \% = 55,9 \%. \quad (2)$$

Таким образом, снижение содержания воздушных пустот с 6,4% до 2,0% обеспечивает улучшение колееустойчивости на 55,9%, что подтверждает

значимость качественного уплотнения для обеспечения деформационной устойчивости покрытий [6, 7] (см. также работу В.Н. Братчуна<sup>3</sup>).

Влияние проницаемости на трещиностойкость материала менее выражено. Индекс трещиностойкости варьировался при низкотемпературных испытаниях от 0,19 до 0,08 при изменении пористости от 6,4 до 2,0%. Относительная разница составила около 7% между образцами со стандартным и повышенным уплотнением, что не выходило за пределы погрешности измерений [3]. Это свидетельствует о том, что низкотемпературная трещиностойкость в большей степени определяется свойствами битумного вяжущего и минерального остова, чем степенью уплотнения материала.

Модуль жесткости асфальтобетонных образцов при непрямом растяжении продемонстрировал устойчивую положительную корреляцию со степенью уплотнения. Для количественной оценки данной зависимости проведен анализ изменения модуля при изменении пористости (таблица 2) [1-3, 7].

Таблица 2

Зависимость модуля жесткости от содержания воздушных пустот

Переход между состояниями	Изменение содержания пустот, %	Изменение модуля жесткости, МПа	Прирост модуля на 1% снижения пустот, МПа
от 6,4 к 3,3 %	3,1	1114	359
от 3,3 к 2,0 %	1,3	465	358
от 6,4 к 2,0 %	4,4	1579	359

Представленные данные свидетельствуют о линейной зависимости модуля жесткости от степени уплотнения. Снижение содержания воздушных пустот на 1% обеспечивает прирост модуля жесткости примерно на 360 МПа [4].

<sup>3</sup>Братчун, В. И. Модифицированные дорожные асфальтобетоны повышенной долговечности / В.И. Братчун, О. А. Пшеничных, В. Л. Беспалов // Донецкие чтения 2023: Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: сборник статей конференции «Донецкие чтения 2023»: Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности, Макеевка, 25-27 октября 2023 г. – Макеевка: Донецкий государственный университет, 2023. – С. 312-314.

Данная закономерность может быть аппроксимирована линейным уравнением:

$$E = E^0 + k \times \Delta\pi, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль жесткости при заданной пористости, МПа;

$E^0$  – базовое значение модуля жесткости, МПа;

$k$  – коэффициент пропорциональности, 360 МПа/%;

$\Delta\pi$  – изменение содержания пустот относительно базового уровня, %.

Возрастание модуля жесткости при повышении плотности материала обусловлено увеличением площади контакта между минеральными частицами и более эффективной передачей напряжений в структуре вещества [4, 5]. Снижение количества воздушных пор способствует формированию более плотного каменного остова, что особенно важно для обеспечения структурной прочности дорожной конструкции.

Морозостойкость материала также демонстрирует корреляцию со степенью уплотнения. Коэффициент морозостойкости возрастает с 0,93 при содержании пустот 6,4% до 1,00 при пористости 2,0%. Низкая проницаемость материала препятствует насыщению пор водой, что минимизирует деструктивное воздействие циклов замораживания – оттаивания [3]. В структуре переуплотненного асфальтобетона практически отсутствуют открытые взаимосвязанные поры, способные заполняться влагой, что обеспечивает высокую морозостойкость покрытий в условиях сурового климата.

Практическая реализация рациональных параметров уплотнения требует применения эффективной дорожно-строительной техники и соблюдения технологических регламентов. Рассмотрим основные факторы, влияющие на достижение требуемой плотности материалом (таблица 3) [1, 3, 7].

Температурный режим служит основным параметром технологического процесса уплотнения асфальтобетонных смесей. Вязкость битумного

вязущего экспоненциально возрастает при снижении температуры, что требует строгого контроля температурных условий производства работ [1].

Таблица 3

### Факторы, влияющие на эффективность уплотнения асфальтобетонных покрытий

Фактор	Рациональный диапазон	Влияние на уплотнение
Температура начала уплотнения, °С	140 - 130	Обеспечивает оптимальную вязкость битума для смазывающего эффекта.
Температура завершения уплотнения, °С	100 - 80	Предотвращает чрезмерное возрастание вязкости вязущего.
Линейная нагрузка tandemного катка, кг/см	30 - 50	Определяет эффективность статического уплотнения.
Частота вибрации виброкатка, Гц	30 - 50	Снижает внутреннее трение в смеси при динамическом воздействии.
Амплитуда вибрации, мм	0,3 - 0,8	Обеспечивает проникновение уплотняющего воздействия на требуемую глубину.
Количество проходов катка	6 - 10	Достижение нормативной плотности без переуплотнения.

Преждевременное начало уплотнения при температуре свыше +150 °С может привести к деформации материала, а запаздывание и попытки уплотнить остывший ниже +70 °С асфальтобетон не позволяют достичь требуемой плотности без увеличения силового воздействия.

Выбор типа уплотняющей техники зависит от состава смеси и толщины укладываемого слоя. Виброуплотнение в определенной мере более эффективно по сравнению со статическим уплотнением tandemными катками, поскольку позволяет сократить количество проходов и время выполнения работ [1]. Вибрация снижает внутреннее трение между минеральными частицами, облегчая их переукладку в более плотную конфигурацию.

Анализ международного опыта нормирования содержания воздушных пустот выявил, что зарубежные спецификации, как правило, не устанавливают жестких нижних пределов уплотнения, признавая положительное влияние высокой плотности материала на эксплуатационные характеристики [3].

Данные института NCAT (National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL, USA) подтверждают экономическую целесообразность качественного уплотнения. Увеличение относительной плотности асфальтобетонного покрытия на 1% улучшает усталостные характеристики от 8 до 44%, прирост сопротивления колееобразованию – от 7% до 66%, а срок службы покрытия возрастает на 10% [3].

### Выводы

Выполненное исследование позволило установить количественные закономерности влияния проницаемости на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий. Высокое содержание воздушных пустот, превышающее нормативные значения, приводит к значительному возрастанию проницаемости материала, что катализирует деструктивные процессы – ускоренное старение битумного вяжущего, адгезионные повреждения, интенсивное колееобразование и растрескивание. Увеличение содержания пустот на 1% после порогового значения в 7% обуславливает сокращение срока службы покрытия на 10%.

Экспериментально подтверждена высокая эффективность рационализации процессов уплотнения для снижения проницаемости асфальтобетонных покрытий. Снижение содержания воздушных пустот с 6,4 до 2,0% обеспечивает улучшение колееустойчивости на 56%, возрастание модуля жесткости на 65%, а также достижение максимальных показателей морозостойкости. Установлена линейная зависимость модуля жесткости от степени уплотнения – каждый процент снижения пористости обеспечивает прирост модуля на 360 МПа.

Достижение параметров уплотнения требует строгого соблюдения температурного режима производства работ в интервале от +140 °С до +80 °С и применения эффективной уплотняющей техники. Результаты исследования обосновывают целесообразность пересмотра нормативных требований к содержанию воздушных пустот в готовых покрытиях. Для щебеночно-

мастичных асфальтобетонов целесообразно расширение нижней границы требований до 2-2,5%, что позволит полностью реализовать потенциал материала по колееустойчивости, морозостойкости и долговечности.

### Список источников

1. Базовые принципы уплотнения асфальта. – URL: <https://nationalrent.ru/spravochnik/stati/bazovye-printsipy-uplotneniya-asfal'ta/> (дата обращения: 27.05.2026).
2. Влияние степени уплотнения асфальтобетона на эксплуатационные свойства. – URL: <https://zaovad.ru/upload/file/2025/04/15/kolesnik-efimenko-dd-2025-130-s22-25.pdf> (дата обращения: 30.06.2026).
3. Илиополов, С. К. Современные пути повышения долговечности асфальтобетонных покрытий / С. К. Илиополов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – № 40. – С. 57-58. – EDN NUZDVR.
4. Кирюхин, Г. Н. О расчетном модуле упругости асфальтобетона / Г. Н. Кирюхин // Автомобильные дороги. – 2023. – № 12 (1105). – С. 113-116. – EDN SLZRMZ.
5. Малинников, А. Н. Метод горячей регенерации асфальтобетонной смеси / А. Н. Малинников // Вестник научных конференций. – 2024. – № 1-2(101). – С. 66-69. – EDN XXSXBN.
6. Расширение производства и применения литых асфальтобетонов / А. П. Лупанов, Ю. Э. Васильев, В. В. Силкин [и др.] // Автомобильные дороги. – 2023. – № 11(1104). – С. 132-137. – EDN SDELWT.
7. Совершенствование подходов и методов оценки физических и эксплуатационных свойств дорожного асфальтобетона в России. – URL: [https://rosdornii.ru/upload/iblock/36c/3d079k47vpqvig4ka9yp6sufuuvltore/12\\_Simchuk\\_EN\\_s\\_soavtorami\\_13.10.2021\\_dlya\\_sayta.pdf](https://rosdornii.ru/upload/iblock/36c/3d079k47vpqvig4ka9yp6sufuuvltore/12_Simchuk_EN_s_soavtorami_13.10.2021_dlya_sayta.pdf) (дата обращения: 26.05.2026).

### References

1. Bazovyye printsipy uplotneniya asfal'ta, available at: <https://nationalrent.ru/spravochnik/stati/bazovye-printsipy-uplotneniya-asfal'ta/> (27.05.2026).
2. Vliyaniye stepeni uplotneniya asfal'tobetona na ekspluatatsionnyye svoystva, available at: <https://zaovad.ru/upload/file/2025/04/15/kolesnik-efimenko-dd-2025-130-s22-25.pdf> (17.06.2026).
3. Iliopolov S.K. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2008, no. 40, pp. 57-58.
4. Kiryukhin G.N. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2023, no. 12 (1105), pp. 113-116.
5. Malinnikov A.N. *Vestnik nauchnykh konferentsiy*, 2024, no. 1-2(101), pp. 66-69.

6. Lupanov A.P., Vasiliev Y.E., Silkin V.V., Kozikov I.O., Silkin A.V. Avtomobil'nyye dorogi, 2023, no.11(1104), pp. 132-137.
7. Sovershenstvovaniye podkhodov i metodov otsenki fizicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv dorozhnogo asfal'tobetona v Rossii, available at: [https://rosdornii.ru/upload/iblock/36c/3d079k47vpqvig4ka9yp6sufuuvltore/12\\_Simchuk\\_EN\\_s\\_s\\_oavtorami\\_13.10.2021\\_dlya\\_sayta.pdf](https://rosdornii.ru/upload/iblock/36c/3d079k47vpqvig4ka9yp6sufuuvltore/12_Simchuk_EN_s_s_oavtorami_13.10.2021_dlya_sayta.pdf) (26.05.2026).

Рецензент: А.В. Ушков, канд. техн. наук, доцент, директор Института заочного и дополнительного профессионального образования, МАДИ

### *Информация об авторах*

**Павлов С. А.** – канд. техн. наук, доцент, МАДИ, Москва;  
**Тимофеев Е. Д.** – студент, МАДИ, Москва;  
**Дурманов Илья** – студент, МАДИ, Москва.

### *Information about the authors*

**Pavlov S. A.** – Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI, Moscow;  
**Timofeev E. D.** – student, MADI, Moscow;  
**Durmanov I.** – student, MADI, Moscow.

*Статья поступила в редакцию 17.12.2025; одобрена после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 19.06.2026.*

*The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 21.01.2026; accepted for publication 19.06.2026.*