



СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ/CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.71.7>

EDN: HOGTSQ

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Научная статья

Хорунжий В.Д.^{1,*}, Шестаков Н.И.²¹ ORCID : 0009-0000-8564-0290;² ORCID : 0000-0002-6809-4993;^{1,2} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (heck20district[at]gmail.com)

Аннотация

В статье рассмотрены гидрофизические механизмы деградации структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации автомобильных дорог. Показано, что водонасыщение и циклическое замораживание приводят к трансформации порово-трещинной системы материала, сопровождающейся ростом дефектного пространства и развитием микротрещин вдоль межфазной границы «битум — минеральный заполнитель». Экспериментальные исследования выполнены на образцах щебеночно-мастичного асфальтобетона с применением цифрового морфологического анализа микрошлифов. Для количественной оценки структурных изменений предложен показатель дефектности структуры и коэффициент структурной деградации. Установлено увеличение площадной дефектности структуры с 8,09 до 9,30% и линейной дефектности с 6,14 до 7,04% после пяти циклов замораживания и оттаивания, что свидетельствует о развитии порово-трещинной системы материала уже на ранней стадии гидрофизического воздействия. Полученные результаты подтверждают, что проникновение влаги и последующие фазовые переходы воды инициируют рост и объединение существующих дефектов структуры, а также формирование новых микропустот и микротрещин. Предложенный подход позволяет количественно характеризовать ранние стадии деградации асфальтобетона и может быть использован при анализе процессов формирования эксплуатационных повреждений дорожных покрытий.

Ключевые слова: асфальтобетон, гидрофизическая деградация, водонасыщение, циклы замораживания и оттаивания, микроструктура, морфологический анализ, дефектность структуры, долговечность дорожных покрытий.

HYDROPHYSICAL MECHANISMS OF ASPHALT CONCRETE STRUCTURAL DEGRADATION DURING SERVICE

Research article

Khorunzhii V.D.^{1,*}, Shestakov N.I.²¹ ORCID : 0009-0000-8564-0290;² ORCID : 0000-0002-6809-4993;^{1,2} Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (heck20district[at]gmail.com)

Abstract

The article examines the hydrophysical mechanisms of asphalt concrete structural degradation during the service life of motorways. It is shown that water saturation and cyclic freezing lead to the transformation of the material's porous-fissured system, accompanied by an increase in the defect volume and the development of microcracks along the 'bitumen-mineral aggregate' interphase boundary. Experimental studies were carried out on samples of crushed stone mastic asphalt using digital morphological analysis of micro-sections. To quantitatively evaluate structural changes, a structure defect index and a structural degradation coefficient are suggested. An increase in the areal structural defect rate from 8.09% to 9.30% and the linear structural defect rate from 6.14% to 7.04% was observed after five freezing and thawing cycles, indicating the development of a porous-fissured system in the material already at an early stage of hydrophysical exposure. The obtained results confirm that moisture intrusion and subsequent phase transitions of water initiate the growth and merging of existing structural defects, as well as the formation of new microvoids and microcracks. The proposed approach allows for the quantitative characterisation of the early stages of asphalt concrete degradation and can be used in the analysis of the processes leading to the formation of service-induced damage in road pavements.

Keywords: asphalt concrete, hydrophysical degradation, water saturation, freezing and thawing cycles, microstructure, morphological analysis, structural defects, durability of road pavements.

Введение

Долговечность асфальтобетонных покрытий в условиях эксплуатации определяется совокупностью механических, температурных и влажностных воздействий, действующих в структуре материала на протяжении всего срока службы. Несмотря на нормативное увеличение межремонтных сроков, фактическое состояние покрытий нередко характеризуется преждевременным развитием дефектов, среди которых наиболее распространены выкрашивание, шелушение, выбоины и поверхностное разрушение слоя износа. Анализ причин их возникновения показывает, что



ключевую роль в инициировании данных повреждений играет водонасыщение и связанная с ним деградация межфазных связей в структуре асфальтобетона [1].

Вода, проникая в поровое пространство покрытия, изменяет напряженно-деформированное состояние материала, снижает адгезию битума к минеральному заполнителю и инициирует развитие микротрещин. При повторных циклах замораживания и оттаивания наблюдается прогрессирующее разрушение поверхностного слоя, что подтверждается экспериментальными исследованиями глубины повреждений при оценке морозостойкости асфальтобетона [2]. В условиях динамического транспортного воздействия водонасыщенная структура становится более восприимчивой к накоплению остаточных деформаций и локальному разрушению.

Современные исследования, посвященные повышению водо- и морозостойкости асфальтобетонов, преимущественно ориентированы на модификацию битумного вяжущего и введение функциональных добавок. Так, применение модифицированных битумов и полимерных компонентов позволяет повысить сопротивляемость структуры воздействию влаги и температурных колебаний [3], [4]. Аналогичные результаты получены при использовании металлизированных углеродных волокон, способствующих стабилизации структуры и повышению водостойкости материала [5]. Введение нанодисперсных добавок и углеродных нанотрубок также демонстрирует положительное влияние на физико-механические и гидрофизические характеристики асфальтобетона за счет формирования более устойчивой микроструктуры и повышения когезионной прочности битумной матрицы [6], [7].

В ряде работ отмечается влияние волокнистых и целлюлозных компонентов на повышение сдвигоустойчивости и водостойкости щебеночно-мастичных асфальтобетонов, что обусловлено стабилизацией пространственного каркаса и снижением подвижности битумной фазы [8]. Дополнительные исследования направлены на оптимизацию использования каменных материалов с целью формирования более плотной и устойчивой к водопроникновению структуры [9].

Вместе с тем анализ опубликованных исследований показывает, что большинство работ рассматривает водостойкость как интегральный показатель качества материала без детального раскрытия гидрофизического механизма деградации структуры. Между тем водонасыщение сопровождается комплексом процессов: капиллярным подсосом влаги, развитием порового давления, нарушением адгезионных связей и ускорением физико-химического старения битумного вяжущего. С позиций механики разрушения битумных систем, снижение прочности при динамическом воздействии может быть описано в рамках критериев накопления повреждений и инкубационного времени разрушения [10], что позволяет рассматривать водонасыщение как фактор, сокращающий инкубационный период и ускоряющий переход от упругого к поврежденному состоянию материала.

Таким образом, формирование дефектов асфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации следует рассматривать не только как следствие внешних нагрузок, но как результат гидрофизической деградации структуры материала, протекающей на уровне межфазного взаимодействия «битум — минеральный заполнитель». Недостаточная изученность механизмов данного процесса затрудняет количественную оценку вклада водонасыщения в снижение долговечности покрытия и формирование остаточного ресурса.

В связи с этим актуальной научной задачей является выявление гидрофизических механизмов деградации структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации, установление их связи с изменением прочностных и деформационных характеристик материала и разработка подходов к количественной оценке их вклада в снижение долговечности дорожных покрытий.

Материалы и методы исследования

Для исследования гидрофизических механизмов деградации структуры асфальтобетона применен комплекс экспериментальных и аналитических методов, основанный на морфологическом анализе структуры материала до и после гидрофизического воздействия.

В основу исследования положена модель структурной деградации асфальтобетона, согласно которой развитие эксплуатационных повреждений связано с изменением конфигурации порово-трещинной системы материала. Количественной характеристикой данного процесса принят интегральный показатель дефектности структуры (D), определяемый как отношение суммарной площади дефектных зон к площади исследуемого участка материала по формуле 1:

$$D = \frac{S_{\text{деф}}}{S_{\text{участ}}} \quad (1)$$

где

$S_{\text{деф}}$ — суммарная площадь дефектных участков структуры,

$S_{\text{участ}}$ — площадь анализируемого изображения.

Для оценки изменения структуры под воздействием влаги и циклического замораживания использован коэффициент структурной деградации 2:

$$K_{\text{деф}} = \frac{D_n}{D_0} \quad (2)$$

где

D_n — дефектность исходного материала,

D_0 — дефектность после n циклов воздействия.

Экспериментальные исследования выполнялись на образцах щебеночно-мастичного асфальтобетона типа ЩМА-16. В качестве исследуемых объектов использовали фрагменты материала, полученные методом резки из уплотненных асфальтобетонных образцов. Полученные спилы после шлифовки использовались для проведения морфологического анализа структуры.

Перед проведением исследований образцы доводились до водонасыщенного состояния. Определение водонасыщения выполнялось в соответствии с требованиями ГОСТ 12801.

Для моделирования эксплуатационного воздействия водонасыщенные образцы подвергались циклическому замораживанию при температуре минус 20°C с последующим оттаиванием при температуре 20°C. Число циклов воздействия составляло 5, что позволяет фиксировать раннюю стадию гидрофизической деградации структуры материала.

Изменения структуры асфальтобетона определялись методом цифрового морфологического анализа микрошлифов. Полученные изображения обрабатывались с использованием методов сегментации и бинаризации, что позволило выделить дефектные зоны структуры и определить их геометрические характеристики. Линейная дефектность структуры (3) определялась как отношение суммарной длины границ дефектных зон к площади анализируемого участка:

$$D_L = \frac{L_{\text{деф}}}{S_{\text{участ}}} \quad (3)$$

Сопоставление морфологических характеристик структуры до и после гидротермического воздействия позволило провести экспериментальную валидацию предложенной модели деградации асфальтобетона на ранней стадии эксплуатационного разрушения.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований получены данные, характеризующие изменение морфологических параметров структуры асфальтобетона после водонасыщения и циклического замораживания. Количественная оценка выполнялась на основе анализа цифровых изображений микрошлифов материала.

На рисунке 1 представлены характерные участки структуры асфальтобетона до воздействия водонасыщения и после проведения пяти циклов замораживания и оттаивания.

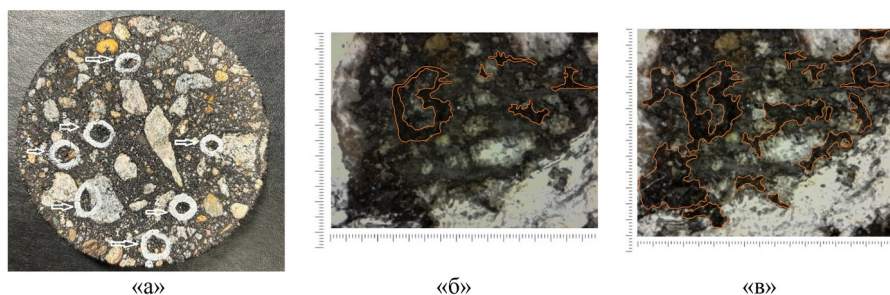


Рисунок 1 - Морфология структуры асфальтобетона:

a – общая структура образца; *б* – исходное состояние; *в* – после 5 циклов замораживания и оттаивания

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.71.7.1>

Анализ изображений показывает, что в исходном состоянии структура материала характеризуется относительно равномерным распределением микропор и дефектных зон. После гидротермического воздействия наблюдается увеличение размеров дефектных областей, а также формирование связанной сети микротрещин преимущественно вдоль границ раздела фаз «битум — минеральный наполнитель».

Количественные результаты морфологического анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Изменение морфологических характеристик структуры асфальтобетона

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.71.7.2>

Показатель	До воздействия	После 5 циклов	Изменение
Площадная дефектность, %	8,09	9,30	+1,21 (15%)
Линейная дефектность, %	6,14	7,04	+0,90 (14,7%)
Количество дефектов	131,6	142,9	+11,3 (8,6%)

Полученные результаты свидетельствуют о систематическом увеличении параметров дефектного пространства структуры асфальтобетона уже на ранней стадии гидрофизического воздействия.

Полученные результаты позволяют количественно оценить изменение структуры асфальтобетона под воздействием водонасыщения и циклического замораживания. Расчет коэффициента структурной деградации, выполненный на основе значений площадной дефектности, показывает увеличение дефектного пространства структуры примерно на 15% после проведения пяти циклов воздействия. Это свидетельствует о том, что даже на ранней стадии гидрофизического воздействия происходит заметная трансформация порово-трещинной системы материала.

Анализ линейной дефектности также показывает увеличение протяженности границ дефектных зон. Рост данного показателя с 6,14 до 7,04% указывает на развитие микротрещин преимущественно вдоль межфазной границы «битум



— минеральный заполнитель». Именно эта зона является наиболее уязвимой при воздействии влаги, поскольку проникновение воды приводит к ослаблению адгезионных связей и снижению прочности контакта между компонентами асфальтобетона.

Увеличение количества дефектов в структуре материала свидетельствует о формировании новых микропустот и микротрещин в результате гидрофизического воздействия. При этом наблюдается постепенное усложнение конфигурации дефектного пространства и рост связности порово-трещинной системы. В дальнейшем такая структура может способствовать более интенсивному проникновению влаги и ускорять развитие макродефектов покрытия.

Сопоставление морфологических характеристик структуры до и после циклического воздействия показывает, что изменения носят системный характер и затрагивают как размеры дефектных областей, так и их пространственное распределение. На микрофотографиях после замораживания наблюдается увеличение размеров отдельных дефектных зон, их частичное объединение, а также появление дополнительных микротрещин вдоль границ минеральных зерен.

Полученные результаты подтверждают, что водонасыщение и последующее замораживание являются ключевыми факторами гидрофизической деградации асфальтобетона. Проникновение воды в поровое пространство материала приводит к перераспределению внутренних напряжений, а при переходе воды в лед происходит дополнительное объемное расширение, вызывающее локальные растягивающие напряжения в структуре материала. В результате происходит раскрытие микропустот и развитие микротрещин, что проявляется в увеличении параметров дефектности структуры.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что количественная оценка морфологических параметров структуры асфальтобетона позволяет выявлять ранние стадии гидрофизической деградации материала и может быть использована для анализа процессов формирования эксплуатационных дефектов дорожных покрытий.

Заключение

Проведенные исследования показали, что водонасыщение и последующее циклическое замораживание оказывают заметное влияние на структуру асфальтобетона уже на ранней стадии эксплуатационного воздействия. Морфологический анализ установил увеличение площадной дефектности структуры с 8,09 до 9,30%, что соответствует росту дефектного пространства примерно на 15%. Одновременно наблюдается увеличение линейной дефектности с 6,14 до 7,04% и рост количества дефектов с 131,6 до 142,9, что свидетельствует о развитии микротрещин и формировании новых микропустот преимущественно вдоль межфазной границы «битум — минеральный заполнитель». Полученные результаты подтверждают, что водонасыщение и циклическое замораживание инициируют развитие порово-трещинной системы асфальтобетона и могут рассматриваться как один из ключевых факторов гидрофизической деградации материала в процессе эксплуатации дорожных покрытий.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Руденский А.В. Выбоины на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог. Причины их возникновения и меры по предотвращению / А.В. Руденский // Дороги и мосты. — 2017. — № 2(38). — С. 9.
2. Котлярский Э.В. Оценка морозостойкости асфальтобетона по глубине разрушения поверхностного слоя / Э.В. Котлярский, В.И. Кочнев // Транспортное строительство. — 2021. — № 1. — С. 5–9.
3. Ядыкина В.В. Водо- и морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона, приготовленного на битуме, модифицированном сэвиленом / В.В. Ядыкина, С.Н. Наволокина, А.М. Гридчин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2022. — Т. 19, № 1(83). — С. 102–113.
4. Ядыкина В.В. Влияние стабилизирующих добавок на устойчивость асфальтобетона к воздействию погодноклиматических факторов / В.В. Ядыкина, С.С. Тоболенко, А.М. Гридчин [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2021. — № 12. — С. 8–15.
5. Подольский В.П. Влияние металлизированных углеродных волокон на водостойкость асфальтобетона / В.П. Подольский, Н.С. Ковалев, Е.В. Яковлев [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2015. — № 2(72). — С. 25–28.
6. Урханова Л.А. Влияние нанодисперсных добавок на физико-механические и гидрофизические свойства асфальтобетона / Л.А. Урханова, Н.И. Шестаков, Д.М. Могнонов [и др.] // Вопросы материаловедения. — 2015. — № 2(82). — С. 54–59.
7. Шеховцова С.Ю. Влияние углеродных нанотрубок на свойства ПБВ и асфальтобетона / С.Ю. Шеховцова, М.А. Высоцкая // Вестник МГСУ. — 2015. — № 11. — С. 110–119.
8. Оев С.А. Влияние микрокристаллической целлюлозы на сдвигоустойчивость и водостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона / С.А. Оев, А.А. Куприянчик // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2017. — № 1(103). — С. 124–125.
9. Пугин К.Г. Повышение эффективности использования каменных материалов в составе асфальтобетона / К.Г. Пугин, Е.Р. Мушегян // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12. — № 2. — DOI: 10.15862/06SATS225



10. Смирнов И.В. Анализ динамической прочности битумных вяжущих для асфальтобетона в терминах критерия инкубационного времени разрушения / И.В. Смирнов, Ю.В. Петров // Физическая мезомеханика. — 2020. — Т. 23, № 2. — С. 24–34.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rudenskij A.V. Vyboiny na asfal'tobetonnyh pokrytijah avtomobil'nyh dorog. Prichiny ih vozniknovenija i mery po predotvrashheniju [Potholes in asphalt concrete pavements of highways. Causes of their occurrence and preventive measures] / A.V. Rudenskij // Dorogi i mosty [Roads and Bridges]. — 2017. — № 2(38). — P. 9. [in Russian]
2. Kotljarskij Je.V. Ocenka morozostojkosti asfal'tobetona po glubine razrushenija poverhnostnogo sloja [Assessment of asphalt concrete frost resistance by the depth of destruction of the surface layer] / Je.V. Kotljarskij, V.I. Kochnev // Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]. — 2021. — № 1. — P. 5–9. [in Russian]
3. Jadykina V.V. Vodo- i morozostojkost' shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona, prigotovlennogo na bitume, modifitsirovannom sevilenom [Water and frost resistance of stone mastic asphalt concrete prepared with sevilen-modified bitumen] / V.V. Jadykina, S.N. Navolokina, A.M. Gridchin // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [The Russian Automobile and Highway Industry Bulletin]. — 2022. — Vol. 19, № 1(83). — P. 102–113. [in Russian]
4. Jadykina V.V. Vlijanie stabilizirujushhih dobavok na ustojchivost' asfal'tobetona k vozdeystviyu pogodno-klimaticheskikh faktorov [Influence of stabilizing additives on the resistance of asphalt concrete to weather and climatic factors] / V.V. Jadykina, S.S. Tobolenko, A.M. Gridchin [et al.] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. — 2021. — № 12. — P. 8–15. [in Russian]
5. Podol'skij V.P. Vlijanie metallizirovannyh uglerodnih volokon na vodostojkost' asfal'tobetona [Influence of metallized carbon fibers on water resistance of asphalt concrete] / V.P. Podol'skij, N.S. Kovalev, E.V. Jakovlev [et al.] // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli [Science and Technology in the Road Industry]. — 2015. — № 2(72). — P. 25–28. [in Russian]
6. Urhanova L.A. Vlijanie nanodispersnyh dobavok na fiziko-mehanicheskie i gidrofizicheskie svojstva asfal'tobetona [Influence of nanodispersed additives on physical-mechanical and hydrophysical properties of asphalt concrete] / L.A. Urhanova, N.I. Shestakov, D.M. Mogonov [et al.] // Voprosy materialovedenija [Problems of Materials Science]. — 2015. — № 2(82). — P. 54–59. [in Russian]
7. Shehovcova S.Ju. Vlijanie uglerodnih nanotrubok na svojstva PBV i asfal'tobetona [Influence of carbon nanotubes on the properties of polymer-bitumen binder and asphalt concrete] / S.Ju. Shehovcova, M.A. Vysockaja // Vestnik MGSU [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering]. — 2015. — № 11. — P. 110–119. [in Russian]
8. Oev S.A. Vlijanie mikrokristallicheskoj cellulozy na sdvigoustojchivost' i vodostojkost' shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona [Influence of microcrystalline cellulose on shear resistance and water resistance of stone mastic asphalt concrete] / S.A. Oev, A.A. Kuprijanchik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture]. — 2017. — № 1(103). — P. 124–125. [in Russian]
9. Pugin K.G. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija kamennyh materialov v sostave asfal'tobetona [Improving the efficiency of using stone materials in asphalt concrete composition] / K.G. Pugin, E.R. Mushegjan // Transportnye sooruzhenija [Transport Facilities]. — 2025. — Vol. 12. — № 2. — DOI: 10.15862/06SATS225 [in Russian]
10. Smirnov I.V. Analiz dinamicheskoj prochnosti bitumnyh vjazhushhih dlja asfal'tobetona v terminah kriterija inkubacionnogo vremeni razrushenija [Analysis of dynamic strength of bituminous binders for asphalt concrete in terms of the incubation time fracture criterion] / I.V. Smirnov, Ju.V. Petrov // Fizicheskaja mezomehanika [Physical Mesomechanics]. — 2020. — Vol. 23, № 2. — P. 24–34. [in Russian]