

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 268–278.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 268–278.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.8+667.621.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278

EDN: YUXNQF

АСФАЛЬТЕНОГЕНЕЗ В БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИХ СТАРЕНИЯ

Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Все более актуальной становится проблема замедления старения асфальтобетонных дорожных покрытий, поскольку именно их состояние определяет межремонтные сроки и долговечность автомобильных дорог.

Органические вяжущие в битумоминеральных композициях (БМК) начинают подвергаться старению уже на стадии их изготовления. Этот процесс происходит на протяжении всего жизненного цикла асфальтобетона. Сложные физико-химические превращения происходят в первую очередь в адсорбционно-сольватных пленках битума на поверхности зерен минеральных материалов. Идут процессы дальнейшей полимеризации компонентов нефтяного вяжущего, сопровождающиеся увеличением их молекулярных масс в последовательности: масла → смолы → асфальтены. Повышение концентрации асфальтенов предложено называть асфальтеногенезом. Этот термин означает уменьшение содержания низкомолекулярных и увеличение высокомолекулярных фракций; рост вязкости битумных пленок, повышение их хрупкости при отрицательных температурах и, как следствие, усиление трещинообразования, разрушение дорожной одежды еще до наступления установленных нормативами сроков службы.

Целью работы являлось исследование процессов старения БМК во временном континуме под влиянием природно-климатических факторов путем контроля содержания асфальтенов в материале конструктивного слоя. Поскольку асфальтены являются практически стопроцентным концентратом парамагнитных центров, интенсивность асфальтеногенеза можно оценивать по изменениям концентрации парамагнитных центров. Таким образом, концентрация парамагнитных центров в БМК может выступать в качестве косвенного показателя степени старения БМК.

Материалы и методы исследования. В качестве минеральных компонентов использовались гранит и известняк. Вяжущим веществом служил битум марки БНД 90/130, а роль дисперсной арматуры играли полиамидные волокна, адсорбат – сырая нефть Первомайского месторождения (Томская обл.). Изменения концентрации парамагнитных центров в образцах БМК оценивались методом ЭПР на приборе RADIOPAN SE/X-25-44 с рубиновыми стержнями.

Результаты. В работе развита идея оценивания степени асфальтеногенеза по количеству парамагнитных центров в БМК. Обоснована возможность модифицирования поверхности минеральных материалов в процессе приготовления БМК путем введения в их состав полимерной дисперсной арматуры из отрезков обработанных химических волокон, пропитанных нефтепродуктами. Предложенное техническое решение позволяет снизить интенсивность асфальтеногенеза, а следовательно, и старение битумоминеральных композиций.

Ключевые слова: битумоминеральная смесь, асфальтогенез, адсорбция, метод ЭПР, полимерно-дисперсное армирование, битум, старение асфальтобетона, модифицирование

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Асфальтогенез в битумоминеральных композициях как показатель их старения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 268–278. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278. EDN: YUXNQF

ORIGINAL ARTICLE

ASPHALTENE GENESIS IN BITUMEN-MINERAL COMPOSITIONS AS AGEING INDICATOR

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The problem of reducing the aging intensity of asphalt concrete pavements, which determines periods between repairs and road durability, is becoming increasingly urgent. Organic binders in bitumen-mineral compositions (BMC) start ageing already during their manufacture. This process occurs throughout the entire life cycle of asphalt concrete. Complex physicochemical transformations occur first of all, in adsorption-solvation films of bitumen on the grain surface of mineral materials. Further polymerization of oil binder components is accompanied by an increase in their molecular weight in the following order: oils → resins → asphaltenes. It is proposed to call the increase in the asphaltene concentration asphaltene genesis. This term means a decrease in the content of low-molecular fractions and an increase in high-molecular fractions; growth in viscosity of bitumen films, increase in their brittleness at negative temperatures and, as a consequence, increase in the crack formation, destruction of road surface even before the service life established by standards. It is proposed to estimate the degree of asphaltene by the quantity of paramagnetic centers in BMC.

Purpose: The aim of the work is to study the BMC ageing under the influence of natural and climatic factors by control the content of asphaltenes in the structural layer. Since asphaltenes are one hundred percent concentrate of paramagnetic centers, the intensity of the asphaltene formation can be estimated by changes in the concentration of paramagnetic centers. Thus, the concentration of paramagnetic centers in the BMC can act as an indirect indicator of BMC aging.

Methodology/approach: Granite and limestone were used as mineral components. BND 90/130 bitumen served as a binder, while polyamide fibres acted as dispersed reinforcement and crude oil from the Pervomaisky field (Tomsk Region) served as an adsorbate. Changes in the concentration of paramagnetic centres in BMC samples were evaluated using the EPR method on a RADIOPAN SE/X-25-44 device with ruby rods.

Research findings: The surface modification of mineral materials is shown during the BMC preparation by an introduction of polymer dispersed reinforcement in the BMC composition from sections of processed chemical fibers impregnated with oil products. The proposed solution allows decreasing the intensity of asphaltene formation, and, consequently, aging of bitumen-mineral compositions.

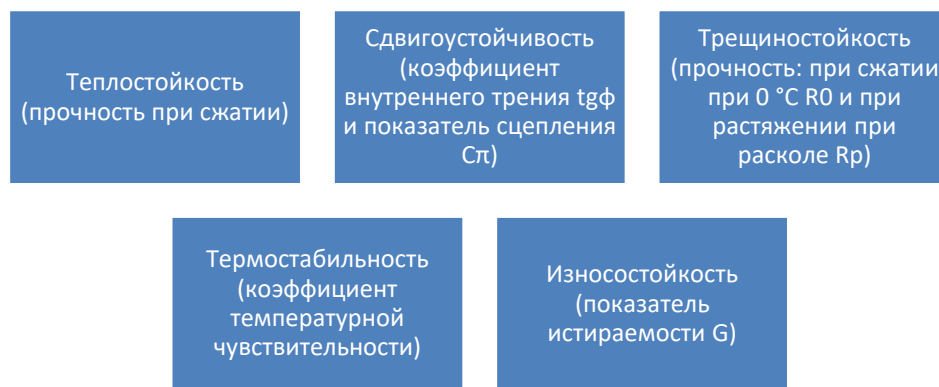
Keywords: bitumen-mineral mixture, asphaltene, adsorption, polymer-dispersed reinforcement, bitumen, asphalt concrete aging, modification

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Asphaltene Genesis in Bitumen-Mineral Compositions as Ageing Indicator. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 268–278. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278. EDN: YUXNQF

Широкое использование в дорожном строительстве битумоминеральных композиций (БМК) связано с такими их характеристиками, как технологичность получения, функциональность устройства конструктивных слоев дорожных одежд, в дальнейшем – простота ремонта и содержания. Поскольку в качестве органических вяжущих, используемых для получения БМК, применяются битумы, основные недостатки БМК предопределены свойствами битумов. Их термопластичность обуславливает низкую сдвигоустойчивость дорожного покрытия при высоких температурах. В результате появляются волны, гребенки, колеи, а также иные виды дефектов, вплоть до глубоких разрушений конструктивного слоя.

Указанные деформации связаны с процессами, протекающими в адсорбционно-сольватных оболочках битума. Повышенные температуры делают их эластичными, плохо сопротивляющимися нагрузкам, что приводит к росту сдвиговых деформаций конструктивного слоя из БМК. Низкие зимние температуры вызывают снижение эластичности пленок битума в адсорбционно-сольватных оболочках, что обуславливает формирование трещин.

На рисунке схематично показаны основные свойства БМК, являющиеся ключевыми в обеспечении долговечности дорожных покрытий, непосредственно связанные с процессами, протекающими в адсорбционно-сольватных оболочках битума.



Основные свойства БМК
Main properties of BMS

Старение БМК является результатом целого ряда физико-химических процессов, среди которых первые позиции занимают избирательная фильтрация органических веществ на стадии получения БМК и трансформирование компонентов БМК под влиянием климатических условий, природных явлений, техногенных воздействий при эксплуатации автомобильной дороги. Как показано в работах [1–3], для битумоминеральных композиций одной из основных форм старения нефтяного битума являются изменения соотношения компонентов битума в приповерхностных слоях.

На интенсивность процесса старения оказывают влияние следующие факторы: испарение легкой фракции мальтеновой части нефтяного битума,

кислород воздуха, температура конструктивного слоя. Также очень важным фактором является процесс фракционирования компонентов битума (избирательная фильтрация), который начинается при обработке минеральных материалов битумом и сопровождает весь жизненный цикл конструктивного слоя. При избирательной фильтрации во внутреннее пространство (тонкие поры) минерального материала проникают масла, у поверхности распределены смолы, непосредственно на поверхности – асфальтены. В результате избирательной фильтрации адсорбционно-сольватные оболочки битума обедняются низкомолекулярными фракциями, что ускоряет старение битумоминеральных композиций. Адсорбция в данном случае имеет необратимый характер. Указанные процессы проявляются в структурных изменениях состава битума. Старение масел сопровождается преобразованием их в смолы, которые, в свою очередь, превращаются в асфальтены [4–7]. Эти процессы ускоряются в присутствии содержащихся в минеральных порошках полутонких оксидов – Fe_2O_3 и Al_2O_3 , играющих роль катализаторов, что показано в работах [8–11].

Процесс увеличения концентрации асфальтенов в нефтяном битуме при его старении предложено назвать термином «асфальтогенез». Под этим термином будем понимать совокупность существенных изменений в качественном и количественном составе компонентов нефтяного битума: снижение концентрации низкомолекулярных фракций (масел и смол) и рост высокомолекулярных фракций (асфальтенов). Ранее подобные физико-химические превращения были описаны исследователями в работах [12–22]. Трансформации, происходящие в составе нефтяного битума, приводят к ухудшению реологических и прочностных свойств битумоминеральных композиций. Увеличивается относительное удлинение при разрыве, растут прочность и модуль упругости. Достигнув максимальных значений в среднем за 10-летний период, эти показатели падают. Авторами [23, 24] установлено, что при старении битумоминеральных композиций при различных температурах концентрация асфальтенов может значительно возрастать (до 40 %), что подтверждает протекание асфальтогенеза в его активной фазе.

Когезионные связи между зернами минерального материала обеспечивают образующиеся на их поверхности адсорбционно-сольватные оболочки битума. Потеря низкомолекулярных фракций влечет утрату эластичности, приводит к хрупкости БМК, особенно при низких температурах, интенсивному трещинообразованию и преждевременному разрушению дорожных одежд.

Приведенные выше аргументы и результаты исследований свидетельствуют о том, что для снижения скорости и интенсивности разрушения дорожных одежд из асфальтобетона с использованием БМК необходимо:

- подавлять избирательную фильтрацию компонентов битума;
- уменьшать интенсивность асфальтогенеза;
- ингибировать реакции старения битума, протекающие при участии оксидов железа и алюминия.

Решить поставленные задачи и одновременно улучшить реологические характеристики, повысить показатели физико-механических свойств конструктивных слоев из битумоминеральных композиций возможно путем их дисперсного армирования, описанного ранее в наших работах.

Для снижения стоимости дисперсно-армированных битумоминеральных композиций перспективно применять в качестве дисперсной арматуры химические волокна, полученные путем резки промышленных отходов – волокнистых сорбентов (матов, заградительных бонов и т. д.), отработавших свой ресурс. Такие отходы содержат регулируемое количество собранного углеводородного сырья, разлитого при авариях [25–31]. При их использовании возникает возможность реализации «двухстадийной технологии обработки минеральных материалов двумя типами органических вяжущих», описанной в работе [32].

На первой стадии в минеральный материал следует вводить органическое вяжущее, характеризующееся высокими показателями адгезии. На второй стадии полученная смесь обрабатывается вяжущим с высокими когезионными свойствами. Поэтому при приготовлении битумоминеральных композиций в минеральный материал следует вводить сначала (первая стадия) волокна дисперсной арматуры, содержащие регулируемое количество собранного углеводородного сырья. Углеводородное сырье (нефть, мазут, смолы сланцевые и каменноугольные, различного происхождения фусы, пасты и т. д.) отличается высокими адгезионными свойствами и химической активностью, поскольку содержат большое количество поверхностно-активных веществ (фенолы, кетоны, карбоновые кислоты и т. д.). Вступая в химическое взаимодействие с поверхностью минеральных материалов, эти вещества создают устойчивые хемосорбционные связи. Этот процесс сопровождается коагуляцией пор и капилляров минеральных материалов с модифицированием всех поверхностей. Коагуляция снижает (либо совсем предотвращает) фракционирование и избирательную фильтрацию компонентов нефтяного битума. Активно взаимодействуя с поверхностью минеральных материалов, поверхностно-активные вещества нейтрализуют полутонкие оксиды, что не позволит им выполнять роль катализаторов старения нефтяных битумов.

На второй стадии приготовления смесь минеральных материалов с волокнами дисперсной арматуры, ранее адсорбировавшей углеводороды, соединяется с дозированным количеством нефтяного битума. При этом не происходит избирательная фильтрация с фракционированием компонентов битума. Это объясняется имевшим место на предыдущей стадии заполнением органических пор и капилляров минерального материала. Содержание асфальтенов в верхнем адсорбционном слое поверхности частиц минеральных материалов, покрытых битумом, не будет повышаться, свидетельствуя о том, что интенсивность асфальтеногенеза (за счет фракционирования) снижается. Снижается также интенсивность асфальтеногенеза за счет уменьшения скорости превращения смол в асфальтены, а масел – в смолы. Поскольку оксиды железа и алюминия при взаимодействии с органическими материалами, содержащимися в дисперсной арматуре, уже нейтрализованы как катализаторы старения, их отрицательное влияние на нефтяной битум будет минимальным. В результате на поверхности каждой частицы минерального материала происходит наложение и совместное влияние на свойства БМК адсорбционно-сольватных оболочек двух типов вяжущих. Первый слой (сформировавшийся в результате контакта минеральных материалов с жидкими углеводородами, поглощенными частицами дисперсной арматуры), обеспечивающий хорошую

адгезионную способность, снижает интенсивность избирательной фильтрации компонентов битума. Второй слой представлен собственно нефтяным битумом. Этот слой более водостойкий. Он дает хорошую когезионную связь между частицами минерального материала.

Протекающие таким образом процессы структурообразования в БМК подавляют асфальтогенез. Происходящее повышение содержания низкомолекулярных фракций в приповерхностных слоях нефтяного битума приводит к лучшей их эластичности в холодное время года и, как следствие, к снижению трещинообразования верхнего слоя дорожной одежды. Повышение трещиностойкости обеспечивает также содержащаяся в конструктивном слое дисперсная арматура. Кроме того, пространственная армирующая решетка из дисперсной арматуры повышает сдвигустойчивость материала в летний период, когда конструктивный слой нагревается до температуры 50–60 °С. В целом комплекс вышеуказанных процессов структурообразования БМК увеличивает долговечность асфальтобетонных покрытий. Контроль над изменением концентрации парамагнитных центров в битумоминеральных композициях позволяет делать выводы об интенсивности асфальтогенеза как индикатора старения БМК.

Это подтверждено экспериментально методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Основанием для применения этого метода являлись результаты исследований, свидетельствующие о том, что в асфальтенах сконцентрирована большая часть парамагнитных центров [34–36].

В ходе экспериментальных работ исследовались минеральные материалы кислых и карбонатных пород. Кислые породы были представлены гранитом, а карбонатные – известняком. Исследовались смеси этих пород с нефтяным битумом как образец традиционной технологии приготовления БМК и смеси, созданные путем обработки указанных пород сначала сырой нефтью, а затем нефтяным битумом, как пример двухстадийной технологии приготовления БМК дисперсно-армированными волокнами, полученными путем резки отработанных сорбентов, содержащих регулируемое количество собранной при разливе сырой нефти [31]. В исследованиях использовался нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130 Ачинского НПЗ и сырая нефть Первомайского месторождения Томской области, полученная после центрифугирования дисперсной арматуры из отработанных волокнистых сорбентов. Были приготовлены две группы образцов. Первая группа исследовалась методом ЭПР сразу после смешивания органических и минеральных материалов. Вторая группа исследовалась после того, как материалы были подвергнуты старению в течение шести часов в термостабилизированной камере. Таким образом, смеси подвергались процедуре старения, а затем определялась концентрация в них парамагнитных центров как показателей старения БМК.

Изменения концентрации парамагнитных центров в образцах БМК исследовались по методике, описанной в работе [32].

Результаты исследований интенсивности старения битумоминеральных композиций, оказывающей влияние на изменение концентрации парамагнитных центров в битумоминеральных композициях (асфальтогенез), представлены в таблице.

**Влияние процессов старения битумоминеральных композиций
на изменение в них количества парамагнитных центров
BMC ageing effect on the quantity of paramagnetic centers**

№ п/п	Состав органоминеральной смеси и технология ее производства	Концентрация парамагнитных центров в смеси, г ⁻¹	
		До старения	После старения
1	Гранит + битум (одностадийная технология)	0,22·10 ¹⁷	0,7·10 ¹⁷
2	Гранит + нефть + битум (двухстадийная технология)	0,19·10 ¹⁷ Снижение на 14 %	0,26·10 ¹⁷ Снижение на 63 %
3	Известняк + битум (одностадийная технология)	3,6·10 ¹⁷	6,4·10 ¹⁷
4	Известняк + нефть + битум (двухстадийная технология)	0,4·10 ¹⁷ Снижение на 89 %	4,7·10 ¹⁷ Снижение на 26 %

Как видно из данных таблицы, физико-химические процессы, протекающие при старении БМК, сопровождаются повышением концентрации парамагнитных центров и интенсификации асфальтеногенеза. При этом концентрация парамагнитных центров в смеси битума с гранитом увеличилась в 3,18 раза, а в смеси битума с известняком – только в 1,8 раза. Применение двухстадийной технологии приготовления битумоминеральных композиций позволяет снизить концентрацию парамагнитных центров в смесях с кислыми породами минеральных материалов на 63 %, а в смеси с карбонатными породами – на 26 %. Но при этом изначально, уже на стадии приготовления битумоминеральных композиций, видно, что концентрация парамагнитных центров в смесях с карбонатными породами в 16 раз выше, чем в смесях с кислыми породами. Это можно объяснить тем, что гранит является более плотной породой и процессы избирательной фильтрации компонентов битума в его поры и капилляры происходят менее интенсивно, чем в поры и капилляры известняка, являющегося более пористой породой. Эти результаты соответствуют результатам исследований, выполненных под руководством Н.А. Готовой [22] и профессора Ф.Г. Унгера [35], в которых доказано, что при большем исходном содержании асфальтенов в битуме интенсивность изменения его химического состава при старении меньше.

Таким образом, исследования, выполненные с применением ЭПР, свидетельствуют, что интенсивность асфальтеногенеза, коррелирующая с концентрацией парамагнитных центров, является индикатором старения БМК. Изучение интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов и особенностей влияния полуторных оксидов на интенсивность старения БМК комплексом современных физико-химических методов – задача дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.

2. Гезенцевей Л.Б., Колбанев И.В., Рвачева Э.М. Механо-химические процессы в битумо-минеральных системах // Автомобильные дороги. 1971. № 2. С. 6–9.
3. Бабаев В.И. Старение асфальтобетона в условиях юга России // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 21.
4. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
5. Давыдова А.Р., Гладырь С.А., Телкова Т.Н. Исследование изменений, протекающих в битумах при их глубоком окислении // Труды Союздорнии. 1977. Вып. 100. С. 4–12.
6. Давыдова А.Р. Исследование процесса старения битума под влиянием различных факторов // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 48–54.
7. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. Москва : Транспорт, 1983. 383 с.
8. Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭЦ. Москва : Энергоиздат, 1985. 285 с.
9. Методические рекомендации по технологии применения в асфальтобетоне отвалных золошлаковых смесей теплоэлектростанций. Москва : СоюздорНИИ, 1978. 23 с.
10. Чистяков Б.З., Лялинов А.Н. Использование минеральных отходов промышленности. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1984. 150 с.
11. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification // Advances in Colloid and Interface Science. 2009. V. 145 (1–2). P. 42–82.
12. Farcas F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes // Laboratoire Central des Ponts et Chausses. 1996.
13. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art // Transportation Research Board 999. 1984. P. 13–30. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70285-7
14. Petersen J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships // Transportation Research E-Circular (Vol. 1). Transportation Research Board. Washington, DC, 2009. 68 p.
15. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui // Fuel. 1999. V. 78 (9). P. 1005–1015.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt // Fuel. 1999. V. 78 (12). P. 1407–1416.
17. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. Oxygen absorption behaviors and kinetics // Petroleum Science and Technology. 2003. V. 21 (1). P. 283–299.
18. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes // Petroleum Science and Technology. 2004. V. 22 (3). P. 263–274.
19. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. Average molecular structure parameter changes // Petroleum Science and Technology. 2004. V. 22 (3). P. 275–286.
20. Reyes F.A., Daza C.E., Rondón H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column // Revista EIA. 2012. V. 17. P. 47–56.
21. Глотова Н.А., Горишков В.С., Кац Б.И. Изменение реологических свойств и химического состава битумов при старении // Химия и технология топлив и масел. 1980. № 4. С. 47–49.
22. Слободчиков Ю.В. Исследование влияния условий эксплуатации на надежность битумо-минеральных покрытий автомобильных дорог Северного Казахстана : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1972. 32 с.
23. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of ageing on physical and chemical properties of asphalt cement // Iraqi journal of chemical and petroleum engineering. 2008. V. 9. № 2. P. 9–15.
24. Пишеничных О.А., Скорик Д.С. Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетон в дорожном строительстве // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 141. С. 121–127.
25. Алиахван А., Калгин Ю.И. Улучшение структурно-механических свойств теплового асфальтобетона методом полимерно-дисперсного армирования // Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. 2021. Вып. 61. С. 53–61.

26. Пиеничных О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 143. С. 41–44.
27. Мерзлякин А.Е., Гамеляк И.П. Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно-армированного асфальтобетона // Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд // Труды Союздорнии. 1990. С. 17–25.
28. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report // Transp. Res. Rec. 1983. № 916. P. 6–18.
29. Tessoneau H. Revêtement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisieme Voie Macon nord // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. V. 62. № 650. P. 77–78.
30. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. № 649. P. 61–64.
31. Лукашевич В. Увеличения срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических вяжущих в процессе производства асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 24–25.
32. Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокишин Р.И. Применение электронного парамагнитного резонанса для исследования процессов старения органического вяжущего в дисперсно-армированных основаниях дорожных одежд // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 179–189. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189
33. Флоровская В.Н., Овчинникова Л.И. Люминесцентная микроскопия битуминозных веществ. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 80 с.
34. Верти Дж., Болтон Дж. Теория и практика применения метода ЭПР : пер. с англ. Москва : Мир, 1975. 368 с.
35. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Новосибирск : Сибирская издательская фирма РАН «Наука», 1995. 192 с.
36. Железко Е.П., Печеный Б.Г. О кинетике образования и рекомбинации свободных радикалов в битумах // Труды Союздорнии. 1970. Вып. 46. С. 137–142.

REFERENCE

1. Gezentsvei L.B., Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Asphalt Concrete for Roads. 2nd edn. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (In Russian)
2. Gezentsvei L.B., Kolbanev I.V., Rvacheva E.M. Mechanochemical Processes in Bitumen-Mineral Systems. *Avtomobil'nye dorogi*. 1971; (2): 6–9. (In Russian)
3. Babaev V.I. Ageing of Asphalt Concrete in Southern Russia. *Avtomobil'nye dorogi*. 1994; (3): 21. (In Russian)
4. Bakhrakh G.S. Assessment of Thermal-Oxidative Stability of Asphalt Materials with Regard to Contact Interactions. *Trudy Soyuzdornii*. 1975; (79): 132–140. (In Russian)
5. Davydova A.R., Gladys' S.A., Telkova T.N. Changes in Bitumen During Deep Oxidation. *Trudy Soyuzdornii*. 1977; (100): 4–12. (In Russian)
6. Davydova A.R. Ageing Process of Bitumen under the Influence of Various Factors. *Trudy Soyuzdornii*. 1971; (44): 48–54. (In Russian)
7. Grushko I.M., Korolev I.V., Borshch I.M., Mishchenko G.M. Road Construction Materials. Moscow: Transport, 1983. 383 p. (In Russian)
8. Melent'ev V.A. Composition and Properties of Ash and Slag from Thermal Power Plants. Moscow: Energoizdat, 1985. 285 p. (In Russian)
9. Methodological Recommendations on using Ash and Slag Mixtures from Thermal Power Plants in Asphalt Concrete. Moscow: SoyuzdorNII, 1978. 23 p. (In Russian)
10. Chistyakov B.Z., Lyalinov A.N. Use of Industrial Mineral Waste. Leningrad: Stroiizdat, Leningradskoe otdelenie, 1984. 150 p. (In Russian)
11. Lesueur D. The colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009; 145 (1–2): 42–82.
12. Farcas F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 1996.

13. Petersen J. Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art. Transportation Research Board, Washington, DC, 1984. Pp. 13–30.
14. Petersen J. A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships. Transportation Research E-Circular, Vol. 1. Transportation Research Board. 2009.
15. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the Aging Behavior of the Arabian Asphalts Siddiqui. *Fuel*. 1999; 78 (9): 1005–1015.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Investigation of Chemical Transformations by NMR and GPC during the Laboratory Aging of Arabian Asphalt. *Fuel*. 1999; 78 (12): 1407–1416.
17. Qi Y., Wang F. Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and their Constituents during Oxygen Absorption. I. Oxygen Absorption Behaviors and Kinetics. *Petroleum Science and Technology*. 2003; 21 (1): 283–299.
18. Qi Y., Wang F. Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and their Constituents during Oxygen Absorption. II. Chemical Group Composition and Structure Changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004; 22 (3): 263–274.
19. Qi Y., Wang F. Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and their Constituents During Oxygen Absorption. III. Average Molecular Structure Parameter Changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004; 22 (3): 275–286.
20. Reyes F.A., Daza C.E., Rondón H.A. Determination of SARA Fractions of Environmentally Aged Colombian Asphalts using Liquid Chromatography Column. *Revista EIA*. 2012; (17): 47–56.
21. Glotova N.A., Gorshkov V.S., Kats B.I. Changes in Rheological Properties and Chemical Composition of Bitumen during Ageing. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1980; (4): 47–49. (In Russian)
22. Slobodchikov Yu.V. Influence of Operating Conditions on the Reliability of Bituminous Mineral Coatings of Motor Roads in Northern Kazakhstan. PhD Abstract. Moscow, 1972. 32 p. (In Russian)
23. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of Ageing on Physical and Chemical Properties of Asphalt Cement. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2008; 9 (2): 9–15.
24. Pshenichnykh O.A., Skorik D.S. Experience in Using Dispersion-Reinforced Asphalt Concrete in Road Construction. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020; (141): 121–127. (In Russian)
25. Alshakhvan A., Kalgin Yu.I. Improvement of Structural and Mechanical Properties of Warm Asphalt Concrete by Polymer-Disperse Reinforcement. *Proektirovanie i stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonnelei*. 2021; (61): 53–61. (In Russian)
26. Pshenichnykh O.A. Deformation and Strength Properties of Dispersion-Reinforced Asphalt Concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020; (143): 41–44. (In Russian)
27. Merzlikin A.E., Gamelyak I.P. Testing of Road Pavement Structures to Assess the Effectiveness of Dispersed Reinforced Asphalt Concrete. In: Design, calculation and testing of road pavements. *Trudy Soyuzdornii*. 1990; 17–25. (In Russian)
28. Smith R.D. Laboratory Testing of Fabric Interlayer for Asphalt Concrete Paving: Interim Report. *Transportation Research Record*. 1983; (916): 6–18.
29. Tessoneau H. Revêtement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisième Voie Macon nord. *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988; 62 (650): 77–78.
30. Pinaud Y, Hintzi J, Poirier J, Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans. *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988; (649): 61–64.
31. Lukashevich V.N. Service Life Increase of Asphalt Pavements by Two-Stage Introduction of Organic Binders in Asphalt Concrete Production. *Stromaitel'nye terialy*. 2003; (1): 24–25. (In Russian)
32. Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Electron Paramagnetic Resonance in Organic Binder Aging in Dispersely Reinforced Substructures. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (6): 179–189. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189 (In Russian)
33. Florovskaya V.N., Ovchinnikova L.I. Fluorescent Microscopy of Bituminous Substances. Moscow: Moscow University Press, 1970. 80 p. (In Russian)
34. Wertz J., Bolton J. Theory and Practice of the EPR Method. Moscow: Mir, 1975. 368 p. (Russian translation)

35. Unger F.G., Andreeva L.N. Fundamental Aspects of Petroleum Chemistry. The Nature of Resins and Asphaltenes. Novosibirsk: Nauka, 1995. 192 p. (In Russian)
36. Zhelezo E.P., Pecheny B.G. On the Kinetics of Formation and Recombination of Free Radicals in Bitumen. *Trudy Soyuzdornii*. 1970; (46): 137–142.35. (In Russian)

Сведения об авторах

Лукашевич Виктор Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vnluc@yandex.ru

Лукашевич Ольга Дмитриевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

Authors Details

Viktor N. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vnluc@yandex.ru

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.09.2025
Одобрена после рецензирования 09.09.2025
Принята к публикации 10.09.2025

Submitted for publication 05.09.2025
Approved after review 09.09.2025
Accepted for publication 10.09.2025