ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.046.2:666.96

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189

*В.Н. ЛУКАШЕВИЧ, О.Д. ЛУКАШЕВИЧ, Р.И. МОКШИН,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЯЖУЩЕГО В ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Актуальность работы предопределена потребностью увеличения срока службы конструктивных слоев дорожных одежд, выполненных из дисперсно-армированных органоминеральных смесей, за счет снижения интенсивности старения органического вяжущего, которое начинается на стадии приготовления органоминеральных смесей и длится в течение всего периода эксплуатации конструктивного слоя. В результате старения органического вяжущего адсорбционно-сольватные оболочки на поверхности минеральных материалов становятся более вязкими, приобретают повышенную хрупкость. Трещинообразование становится более интенсивным, дорожные одежды, запроектированные и построенные в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, разрушаются, не выдерживая установленных сроков службы. Дисперсное армирование конструктивных слоев дорожных одежд химическими волокнами из отработанных сорбентов, содержащих регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, может быть одним из методов, позволяющих частично решить эту проблему.

Целью работы являлось исследование интенсивности старения вяжущего в органоминеральных смесях с применением методов электронного парамагнитного резонанса. Оценка интенсивности старения органического вяжущего производилась по концентрации в нем парамагнитных центров, поскольку асфальтены представляют собой почти 100%-й концентрат парамагнетиков, что может служить показателем интенсивности процесса старения нефтяной дисперсной системы.

Результаты исследований показывают, что при дисперсном армировании конструктивных слоев дорожных одежд химическими волокнами из отработанных сорбентов, содержащих регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, происходит уменьшение концентрации парамагнитных центров, свидетельствующее о снижении концентрации асфальтенов, что, в свою очередь, говорит о снижении интенсивности старения нефтяной дисперсной системы.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс; дисперсная арматура; нефтяной битум; свободные радикалы; волокнистые сорбенты; избирательная фильтрация; кольматация; адсорбционные слои нефтяного битума.

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокшин 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

V.N. LUKASHEVICH, O.D. LUKASHEVICH, R.I. MOKSHIN,
Tomsk State University of Architecture and Building

ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE IN ORGANIC BINDER AGING IN DISPERSELY REINFORCED SUBSTRUCTURES

Purpose: To study the intensity of binder aging in organo-mineral mixtures using electron paramagnetic resonance. The aging intensity of the organic binder is provided by its concentration in paramagnetic centers, since asphaltene are almost one hundred percent of paramagnet concentration and indicate to the aging intensity of the petroleum dispersion system. **Approach:** Dispersed reinforcement of substructures with chemical fibers made of spent sorbents containing a controlled amount of absorbed oil products allows to partially solve the problem of crack formation and fracture of road pavements designed in accordance with the regulatory documents. **Research implications:** The service life of substructure made of dispersely reinforced organo-mineral mixtures reduces owing to organic binder aging, which begins at the stage of preparation of organo-mineral mixtures and continues during the substructure operation. Organic binder ageing results in the formation of solvation layers on the surface of mineral materials that become more viscous and brittle. **Findings:** The substructure dispersed reinforcement with chemical fibers made of spent sorbents containing a controlled amount of absorbed oil products decreases the concentration of paramagnetic centers. This indicates to a decrease in the asphaltene concentration, thereby reducing the aging intensity of the oil dispersion system.

Keywords: electron paramagnetic resonance; disperse fittings; oil bitumen; free radicals; fibrous sorbents; selective filtration; mud initiation; adsorption layers.

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Primenenie elektronnoy paramagnitnoy rezonans dlya issledovaniya protsessov stareniya organicheskogo vyazhushchego v dispersno-armirovannykh osnovaniyakh dorozhnykh odezhd [Electron paramagnetic resonance in organic binder aging in dispersely reinforced substructures]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 6. Pp. 179–189.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189

Причинами старения конструктивных слоев дорожных одежд из органо-минеральных смесей являются физико-химические процессы, протекающие в адсорбционно-сольватных оболочках битума. Они начинаются при приготовлении смесей и продолжаются в процессе эксплуатации конструктивных слоев дорожной одежды. Огромное влияние на интенсивность старения органического вяжущего оказывают процессы избирательной фильтрации компонентов вяжущего в поры и капилляры минеральных материалов, изменяющие структуру адсорбционно-сольватных оболочек, а также воздействие природ-

но-климатических факторов, приводящее к изменению фракционного состава нефтяного битума. Академик Л.Б. Гезенцев отмечал: «...изменение компонентного состава приповерхностных слоев битума представляет собой одну из форм интенсивного старения битума, характерную для битумоминеральных композиций...» [1].

В процессе избирательной диффузии наименее вязкие компоненты битума – масла – проникают вглубь материала. Смолами заполняются мелкие поры. Асфальтены являются твердыми и хрупкими компонентами битума. Они адсорбируются на поверхностях частиц минерального материала. Это приводит к повышению механической прочности и температурной устойчивости битумоминеральных композиций, но одновременно снижает трещиностойкость при отрицательных температурах и способствует ускорению интенсивности старения материала конструктивного слоя.

Процесс старения битумоминеральных композиций происходит также под воздействием природно-климатических факторов и сопровождается переходом смол в асфальтены, а масел – в смолы [2–5]. Катализаторами этого процесса являются полуторные оксиды (Al_2O_3 , Fe_2O_3) [6–9].

Вследствие избирательной диффузии компонентов органического вяжущего, изменения фракционного состава его пленок, отрицательного влияния полуторных оксидов, ускоряющих процессы негативного фракционирования, адсорбционные слои нефтяного битума на поверхности минеральных материалов обедняются низкомолекулярными фракциями. В результате потери низкомолекулярных фракций адсорбционные слои нефтяного битума, обеспечивающие когезионную связь между частицами минеральных материалов, теряют эластичность, становятся более вязкими, а следовательно, и более хрупкими при отрицательных температурах. Снижается трещиностойкость конструктивных слоев из битумоминеральных композиций. В трещины покрытия проникает вода и замерзает при отрицательных температурах, что приводит к разрушению конструктивных слоев и сокращению сроков их службы.

Из вышесказанного следует, что продлить сроки службы конструктивных слоев дорожных одежд из битумоминеральных композиций возможно путем замедления процессов фракционирования нефтяного битума, снижения интенсивности избирательной диффузии, а также нейтрализации полуторных оксидов как катализаторов старения нефтяного битума. Это может быть достигнуто путем дисперсного армирования органоинеральных композиций [10–16].

Дисперсное армирование целесообразно производить отрезками химических волокон, полученных из волокнистых сорбентов, отработавших свой ресурс и содержащих регулируемое количество углеводородного сырья, собранного при ликвидации разливов, имеющих место в результате крушения танкеров, при авариях на нефтепроводах, буровых установках. Реализация этой технологии предоставляет возможность обработки минеральных материалов органическими вяжущими в два этапа [17]. На первой стадии в минеральный материал вводятся волокнистые сорбенты, содержащие регулируемое количество собранных нефтепродуктов, на второй – нефтяной битум. На первой стадии, контактируя с волокнистыми сорбентами, минеральный материал обрабатывается содержащимся в них углеводородным сырьем, собран-

ным при ликвидации аварий. Этим сырьем является чаще всего нефть, мазут, смолы различного происхождения, сланцевые и каменноугольные фусы. А поскольку нефть, мазут, смолы, фусы содержат большое количество поверхностно-активных веществ (фенолы, кетоны, карбоновые кислоты), обеспечивается хорошая адгезия органического вяжущего к поверхности минерального материала. Эти компоненты, вступая в химическое взаимодействие с поверхностью минерального материала, обеспечивают наличие хемосорбционных связей с образованием водонерастворимых соединений на поверхности минерального материала. Кроме того, в процессе избирательной фильтрации активные компоненты проникают по порам и капиллярам внутрь минерального материала, взаимодействуя с поверхностью пор и капилляров. В результате этих процессов происходит кольтматация пор и капилляров минерального материала компонентами вяжущего, используемого на первой стадии.

На второй стадии производится обработка полученной органоминеральной смеси нефтяным битумом. При этом процесс избирательной фильтрации компонентов нефтяного битума в поры и капилляры минерального материала не будет иметь места, т. к. эти поры и капилляры уже заполнены компонентами органического вяжущего на первой стадии. Следовательно, адсорбционные слои нефтяного битума на поверхности минеральных материалов не будут обедняться низкомолекулярными фракциями, что положительно скажется на их эластичности при отрицательных температурах. Кроме того, вследствие наличия в адсорбционном слое нефтяного битума повышенного количества низкомолекулярных фракций процесс перехода масел в смолы, а смол в асфальтены будет происходить менее интенсивно. В результате повысится трещиностойкость асфальтобетона и, как следствие, – долговечность покрытий.

Для проверки выдвинутых предположений были проведены исследования с применением методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В соответствии с теорией, разработанной профессором Ф.Г. Унгером, имеющиеся на поверхности минеральных материалов свободные радикалы могут являться центрами, на которых осаждаются асфальтены, происходит объединение асфальтенов с дальнейшим увеличением их количества [18]. Поскольку асфальтены являются почти 100%-м концентратом парамагнетиков, показателем интенсивности процесса старения нефтяной дисперсной системы может быть концентрация в ней парамагнитных центров, свидетельствующая о концентрации асфальтенов [19–21].

Исследования были выполнены на радиоспектрометре RADIOPAN SE/X-25-44 с частотой 9 ГГц (длина волны 3,2 см). В качестве квазивнутреннего эталона использованы рубиновые стержни, установленные «наглухо» в резонаторе, позволяющие производить измерения, не зависящие от диэлектрических параметров образца. Для исследования электронного парамагнитного резонанса образцы смеси были помещены в кварцевые калиброванные ампулы, закрывающиеся фторопластовой пробкой.

В качестве минеральных материалов в экспериментальных работах были применены гранит и известняк. Модифицирование минеральных материалов осуществляли с использованием сырой нефти Первомайского месторождения Томской области, полученной после центрифугирования сорбентов.

В качестве основного органического вяжущего был использован нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130 Ачинского НПЗ.

Исследовались смеси двух типов:

a – смесь, приготовленная по традиционной технологии (минеральный материал, обработанный нефтяным битумом);

б – смесь, приготовленная с использованием сырой нефти, полученной после центрифугирования сорбентов (минеральный материал, обработанный сначала сырой нефтью, а затем нефтяным битумом).

Технология приготовления смеси *a* предусматривала дозирование минерального материала, его нагрев до температуры 160 °С, дозирование и введение горячего нефтяного битума с последующим перемешиванием.

Технология приготовления смеси *б* предусматривала дозирование минерального материала, его нагрев до температуры 160 °С, дозирование, введение сырой нефти и ее перемешивание с минеральным материалом, дозирование и введение горячего нефтяного битума и окончательное перемешивание.

Были получены спектры ЭПР смесей сразу после смешения компонентов, а также смесей, подвергнутых старению (выдержанных при температуре 160 °С в термостабилизированной камере в течение 6 ч). Определена концентрация парамагнитных центров в смесях. На рис. 1–4 представлены спектры электронного парамагнитного резонанса исследуемых материалов. Концентрация парамагнитных центров в смесях до и после старения представлена в таблице.

Рис. 1. Спектры ЭПР гранита, обработанного органическими вяжущими:

a – гранит + нефть + битум; *б* – гранит + битум

Рис. 2. Спектры ЭПР известняка, обработанного органическими вяжущими:

a – известняк + битум; *б* – известняк + нефть + битум

Спектры ЭПР, представленные на рис. 1–4, свидетельствуют о том, что введение в смесь нефти, содержащейся в дисперсной арматуре, снижает концентрацию парамагнитных центров как до, так и после старения органоминеральной смеси.

Рис. 3. Спектры ЭПР после старения гранита, обработанного органическими вяжущими:
a – гранит + битум; *б* – гранит + нефть + битум

Рис. 4. Спектры ЭПР известняка, обработанного органическими вяжущими:
a – известняк + битум; *б* – известняк + нефть + битум

Результаты количественных исследований содержания парамагнитных центров в смесях, представленные в таблице, показывают, что введение в гранитный материал нефтяного битума приводит к образованию в смеси $0,22 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ парамагнитных центров.

Влияние технологии приготовления битумоминеральных смесей на концентрацию парамагнитных центров

Состав органоминеральной смеси	Концентрация парамагнитных центров в смеси, г^{-1}		Влияние процесса старения на концентрацию парамагнитных центров
	до старения	после старения	
1. Гранит + битум 2. Гранит + нефть + битум	$0,22 \cdot 10^{17}$ $0,19 \cdot 10^{17}$ Снижение на 14 %	$0,7 \cdot 10^{17}$ $0,26 \cdot 10^{17}$ Снижение на 63 %	Увеличение на 218 % Увеличение на 37 %
3. Известняк + битум 4. Известняк + нефть + битум	$3,6 \cdot 10^{17}$ $0,4 \cdot 10^{17}$ Снижение на 89 %	$6,4 \cdot 10^{17}$ $4,7 \cdot 10^{17}$ Снижение на 26 %	Увеличение на 78 % Увеличение на 1075 %

А предварительное модифицирование поверхностей гранитного материала сырой нефтью с последующей обработкой смеси нефтяным битумом приводит к образованию $0,19 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ парамагнитных центров. Следовательно, уже на стадии приготовления смеси введение дисперсной арматуры, содер-

жащей собранную сырую нефть, приводит к снижению концентрации парамагнитных центров в смеси на 14 %. Незначительное снижение концентрации парамагнитных центров при использовании гранитных материалов можно объяснить тем, что гранит относится к кислым породам. На его поверхности, как и в составе нефтяного битума, преобладают анионноактивные центры. Это приводит к слабому взаимодействию нефтяного битума с поверхностью гранита, что обеспечивает более слабую адгезию нефтяного битума и незначительное количество в смеси парамагнитных центров. Кроме того, при обработке гранита битумом очень слабо протекают процессы избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры гранита. Процессы фракционирования компонентов битума также протекают слабо, и адсорбционно-сольватные оболочки битума на поверхности гранита не обедняются низкомолекулярными фракциями. Концентрация парамагнитных центров, свидетельствующая об образовании асфальтенов, незначительна, и введение сырой нефти в смесь снижает эту концентрацию также незначительно.

При использовании в составе смеси известняка процессы его взаимодействия с битумом протекают более интенсивно. Известняк относится к карбонатным породам. На его поверхности преобладают катионноактивные центры, которые вступают во взаимодействие с имеющимися в составе нефтяного битума анионноактивными центрами, что обеспечивает повышенную адгезию нефтяного битума к поверхности известняковых пород. Кроме того, при использовании тонкопористых известняков активно идут процессы избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минерального материала. Происходит фракционирование нефтяного битума. Вглубь материала проникают масла, ближе к поверхности располагаются смолы [22]. На поверхности зерен материала повышается содержание асфальтенов, являющихся 100%-м концентратом парамагнитных центров, что и наблюдается в смеси № 3, где их концентрация достигает $3,6 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$, что в 16,3 раза превышает концентрацию парамагнитных центров в смеси битума и гранита.

Предварительная обработка известняка сырой нефтью перед введением в смесь нефтяного битума приводит к образованию только $0,4 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ парамагнитных центров, что дает девятикратное снижение концентрации парамагнитных центров по сравнению со смесью известняка с битумом. Это является следствием взаимодействия поверхностно-активных веществ, содержащихся в сырой нефти, с поверхностью известняка. Катионноактивные центры на поверхности известняка нейтрализуются. Активно идут процессы фракционирования и избирательной фильтрации компонентов сырой смолы в поры и капилляры известняка. В результате поверхность известняка оказывается модифицированной, и последующая обработка ее нефтяным битумом исключает избирательную фильтрацию компонентов битума в поры и капилляры. Адсорбционно-сольватные оболочки битума не обедняются низкомолекулярными фракциями, концентрация асфальтенов снижается, о чем и свидетельствует девятикратное снижение концентрации парамагнитных центров с $3,6 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ до $0,4 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$.

Концентрация парамагнитных центров существенно меняется после старения смесей. Гранит, обработанный битумом, содержит $0,7 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ пара-

магнитных центров. Тот же гранит, используемый для приготовления смеси по двухстадийной технологии с применением на первой стадии сырой нефти, а на второй – нефтяного битума, содержит только $0,26 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ парамагнитных центров, что составляет 37 %. Это свидетельствует о том, что асфальтенов в смеси образовалось на 63 % меньше и что интенсивность старения смеси гранита с органическим вяжущим при использовании дисперсной арматуры, содержащей сырую нефть, существенно ниже.

Еще более ярко выражено влияние введения дисперсной арматуры, содержащей сырую нефть, на интенсивность старения смесей известняка с органическими вяжущими. Этот факт имеет очень большое значение, поскольку для приготовления минерального порошка используют преимущественно известняковые минеральные материалы. Суммарная поверхность частиц минерального порошка в составе минеральной части асфальтобетонной смеси достигает 90 %. Следовательно, битум обволакивает в основном именно частицы минерального порошка, и характеристики пленок битума зависят от его взаимодействия с этим материалом.

Смесь известняка и битума, не подвергнутая старению, имеет концентрацию парамагнитных центров, достигающую $3,6 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$. После того как эта смесь была подвергнута старению, концентрация парамагнитных центров увеличилась до $6,4 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ (на 78 %). Очень существенно процессы старения повлияли на концентрацию парамагнитных центров в известняке, обработанном сначала сырой нефтью, а затем битумом. Концентрация увеличилась с $0,4 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ до $4,7 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$ (на 1075 %). Причиной этого увеличения, по мнению авторов, является то, что изначально концентрация парамагнитных центров была очень незначительной ($0,4 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$) и адсорбционно-сольватные оболочки содержали большое количество низкомолекулярных фракций. А поскольку процессы старения сопровождаются переходом масел в смолы, а смол в асфальтены [2–5], для образования асфальтенов в смеси № 4 имелось достаточное количество низкомолекулярных фракций (масел и смол), дефицит которых наблюдается в смеси известняка с битумом. Поэтому в смеси № 4 происходило интенсивное преобразование низкомолекулярных фракций в высокомолекулярные. В смеси № 3 вследствие дефицита низкомолекулярных фракций образовалось меньшее количество асфальтенов, о чем и свидетельствует более низкая интенсивность формирования парамагнитных центров. Однако следует отметить, что конечная концентрация парамагнитных центров в смеси № 3 составляет $6,4 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$, а в смеси № 4 – только $4,7 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$. Следовательно, модифицирование сырой нефтью поверхности известняка перед введением битума привело к снижению на 26 % концентрации парамагнитных центров в смеси.

В исследованиях не были учтены парамагнетизм исходных нефтяных битумов и характер пиков поглощения свободных радикалов исследуемых битумо-минеральных смесей. Учет характера пика поглощения свободных радикалов и их отнесение к линии Дайсона либо к гауссо-лоренцевым кривым, оценка несимметричности пика ЭПР-спектра могли бы показать еще более значимые результаты снижения интенсивности образования парамагнитных

центров, свидетельствующие о снижении концентрации асфальтенов в адсорбционно-сольватных оболочках битума [23].

Таким образом, результаты исследований, выполненных с применением методов электронного парамагнитного резонанса, подтвердили, что при дисперсном армировании битумоминеральных композиций отрезками волокон, полученных из отработанных волокнистых сорбентов, предназначенных для сбора и локализации разливов углеводородного сырья, содержащих регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, уменьшается концентрация парамагнитных центров. Это подтверждает факт снижения концентрации асфальтенов, что, в свою очередь, свидетельствует о снижении интенсивности старения нефтяной дисперсной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.
2. Бабаев В.И. Старение асфальтобетона в условиях юга России // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 21.
3. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
4. 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.
5. Давыдова А.Р. Исследование процесса старения битума под влиянием различных факторов // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 48–54.
6. Грушко И.М., Королев И.В., Борц И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. Москва : Транспорт, 1983. 383 с.
7. Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭЦ : справочное пособие. Москва : Энергоиздат, 1985. 285 с.
8. Методические рекомендации по технологии применения в асфальтобетоне отвальных золошлаковых смесей тепловых электростанций. Москва : СоюздорНИИ, 1978. 23 с.
9. Чистяков Б.З., Лялинов А.Н. Использование минеральных отходов промышленности. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1984. 150 с.
10. Пиеничных 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.
11. Алишханов А., Калгин Ю.И. Улучшение структурно-механических свойств теплого асфальтобетона методом полимерно-дисперсного армирования // Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. 2021. Вып. 61. С. 53–61.
12. Пиеничных О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетон // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 143. С. 41–44.
13. Мерзликин 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.
14. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report // Transp. Res. Rec. 1983. № 916. P. 6–18.
15. Tessoneau H. Revêtement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisiene Voie Macon nord // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. V.62. № 650. P. 77–78.
16. 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.

17. Лукашевич В.Н. Увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических вяжущих в процессе производства асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 24–25.
18. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Квантово-химические предпосылки возникновения и существования смолисто-асфальтовых веществ в нефтедобных объектах // Проблемы и достижения в исследовании нефти. Томск : ИХН СО РАН, 1990. С. 100–117.
19. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические применения метода ЭПР : пер. с англ. Москва : Мир, 368 с.
20. Железко Е.П., Печеный Б.Г. О кинетике образования и рекомбинации свободных радикалов в битумах // Труды Союздорнии. 1970. Вып. 46. С. 137–142.
21. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов / Институт химии нефти Сибирского отделения РАН. Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 192 с.
22. Гезенцевей Л.Б. Применение активированного минерального порошка в дорожном строительстве // Труды Союздорнии. 1978. Вып. 107. С. 73–78.
23. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Парамагнетизм нефтяных дисперсных систем и природа асфальтенов. Томск, 1986. 29 с. (Препр. / АН СССР, Сиб. отд.-ние. Ин-т химии нефти; № 38).

REFERENCES

1. Gezentzvey L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavsky A.M., Korolev I.V. Dorozhnyy asfal'tobeton [Asphalt concrete]. 2nd ed., Moscow: Transport, 1985. 350 p. (rus)
2. Babaev V.I. Starenie asfal'tobetona v usloviyah yuga Rossii [Asphalt concrete aging in the South of Russia]. *Avtomobil'nye dorogi*. 1994. No. 3. P. 21. (rus)
3. Bahrach G.S. Ocenka termookislitel'noj stabil'nosti asfal'tovykh materialov s uchetom roli kontaktnykh vzaimodeystvij [Assessment of thermal-oxidative stability of asphalt materials during contact interactions]. *Trudy Soyuzdornii*. 1975. V. 79. Pp. 132–140. (rus)
4. Davydova A.R., Gladys S.A., Telkova T.N. Issledovanie izmenenij, protekayushchih v bitumakh pri ih glubokom okislenii [Changes in bitumen during deep oxidation]. *Trudy Soyuzdornii*. 1977. No. 100. Pp. 4–12. (rus)
5. Davydova A.R. Issledovanie processa stareniya bituma pod vliyaniem razlichnykh faktorov [Bitumen aging under various conditions]. *Trudy Soyuzdornii*. 1971. No. 44. Pp. 48–54. (rus)
6. Grushko I.M., Korolev I.V., Borsch I.M., Mishchenko G.M. Dorozhno-stroitel'nye materialy [Road-building materials]. Moscow: Transport, 1983. 383 p. (rus)
7. Melent'ev V.A. Sostav i svoystva zoly i shlaka TEC [Composition and properties of ash and slag]. Moscow: Energoizdat, 1985. 285 p. (rus)
8. Metodicheskie rekomendacii po tekhnologii primeneniya v asfal'tobetone otval'nykh zoloshlakovykh smesey teploelektrostantsij [Methodological recommendations on application of waste ash and slag from thermal power plants for asphalt concrete]. Moscow: Soyuzdornii, 1978. 23 p. (rus)
9. Chistyakov B.Z., Lyalinov A.N. Ispol'zovanie mineral'nykh othodov promyshlennosti [Industrial mineral waste]. Leningrad: Stroyizdat, 1984. 150 p. (rus)
10. Pshenichnykh O.A., Skorik D.S. Opyt primeneniya dispersno-armirovannykh asfal'tobetonov v dorozhnom stroitel'stve [Experience in the use of dispersed reinforced asphalt concrete in road construction]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 141. Pp. 121–127. (rus)
11. Alshakhvan A., Kalyagin Yu.I. Uluchshenie strukturno-mekhanicheskikh svoystv teplogo asfal'tobetona metodom polimernodispersnogo armirovaniya [Improvement of structural and mechanical properties of warm asphalt concrete by polymer dispersed reinforcement]. *Proektirovanie i stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonnelei*. 2021. No. 61. Pp. 53–61. (rus)
12. Pshenichnykh O.A. Deformacionno-prochnostnye harakteristiki dispersno-armirovannykh asfal'tobetonov [Deformation and strength properties of dispersely reinforced asphalt concrete]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 143. Pp. 41–44. (rus)

13. Merzlikin A.E., Gamelyak I.P. Ispytaniya konstrukcij dorozhnyh odezhd dlya ocenki effektivnosti primeneniya dispersno armirovannogo asfal'tobetona [Effectiveness of pavement structures of dispersely reinforced asphalt concrete]. *Trudy Soyuzdornii*. 1990. (rus)
14. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: Interim report. *Journal of the Transportation Research Board*. 1983. No. 916. Pp. 6–18.
15. Tessoneau H. Revement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisiene Voie Macon nord. *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988. V. 62. No. 650. Pp. 77–78.
16. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans. *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988. No. 649. Pp. 61–64.
17. Lukashevich V.N. Uvelicheniya sroka sluzhby asfal'tobetonnyh pokrytij za schet dvuhstadijnogo vvedeniya organicheskikh vyazhushchih v processe proizvodstva asfal'tobetonnyh smesej [Service life increase of asphalt pavements by two-stage introduction of organic binders in asphalt concrete production]. *Stroitel'nye materialy*. 2003. No. 1. Pp. 24–25. (rus)
18. Unger F.G., Andreeva L.N. Kvantovo-himicheskie predposylki vznikeniya i sushchestvovaniya smolisto-asfal'tenovykh veshchestv v neftepodobnykh ob'ektakh [Quantum-chemical prerequisites for emergence and existence of bitumen in oil-like objects]. In: *Problemy i dostizheniya v issledovanii nefti* [Problems and achievements in oil research]. Tomsk, 1990. Pp. 100–117. (rus)
19. Wertz J., Bolton J. Teoriya i prakticheskie primeneniya metoda EPR [Elementary theory and practical applications]. Moscow: Mir. 368 p. (transl. from Engl.)
20. Zhelezko E.P., Pechenyi B.G. O kinetike obrazovaniya i rekombinacii svobodnykh radikalov v bitumakh [Kinetics of formation and recombination of free radicals in bitumen]. *Trudy Soyuzdornii*. 1970. V. 46. Pp. 137–142. (rus)
21. Unger F.G., Andreeva L.N. Fundamental'nye aspekty himii nefti. Priroda smol i asfal'tenov [Fundamental aspects of oil chemistry. The nature of resins and asphaltenes]. Novosibirsk: Nauka, 1995. 192 p. (rus)
22. Gesenzwey L.B. Primenenie aktivirovannogo mineral'nogo poroshka v dorozhnom stroitel'stve [Application of activated mineral powder in road construction]. *Trudy Soyuzdornii*. 1978. No. 107. Pp. 73–78. (rus)
23. Unger F.G., Andreeva L.N. Paramagnetizm neftyanykh dispersnykh sistem i priroda asfal'tenov [Paramagnetism of oil dispersions and the nature of asphaltenes]. Tomsk, 1986. 29 p. (rus)

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

Мошкин Роман Ильич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mokshinroman@mail.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

Roman I. Mokshin, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mokshinroman@mail.ru