

УДК 624.046.2:666.96

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-178-188

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

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НА АСФАЛЬТЕНОГЕНЕЗ В ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

Аннотация. Актуальность работы предопределена потребностью разработки технологий производства битумоминеральных композиций, позволяющих увеличить сроки службы конструктивных слоев дорожных одежд.

Процесс старения органического вяжущего начинается на стадии приготовления асфальтобетонной смеси и длится в течение всего периода эксплуатации конструктивного слоя. Он протекает в адсорбционно-сольватных оболочках битума на поверхности зерен минеральных материалов и сопровождается преобразованием масел в смолы, а смол – в асфальтены. Предложен новый термин «асфальтеногенез», характеризующий протекающий при старении процесс повышения концентрации асфальтенов. Его следствием является снижение содержания низкомолекулярных фракций в адсорбционно-сольватных оболочках битума и увеличение содержания высокомолекулярных фракций. Пленки битума становятся более вязкими, при отрицательных температурах повышается их хрупкость, увеличивается интенсивность трещинообразования. В результате дорожные одежды, запроектированные и построенные с учетом требований действующей нормативной документации, деформируются и разрушаются, не выдерживая установленных сроков службы. Показано, что применение технологии дисперсного армирования конструктивных слоев дорожных одежд химическими волокнами, полученными из отработанных сорбентов, содержащими регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, может быть одним из путей решения этой проблемы.

Цель работы – исследование влияния технологии производства битумоминеральных композиций на изменение в них концентрации парамагнитных центров, которое служит индикатором содержания асфальтенов. Асфальтены являются главным местом сосредоточения парамагнитных центров. Измерение концентрации парамагнитных центров в дисперсной битумоминеральной композиции позволяет оценить количество асфальтенов и сделать вывод об интенсивности процесса старения дисперсной битумоминеральной композиции.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что рациональной является технология дисперсного армирования битумоминеральных композиций, предусматривающая введение сначала химических волокон, содержащих регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, а затем битума. Это приводит к снижению интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов. Смеси, приготовленные по предлагаемой технологии, подвергшиеся старению в климатической камере, характеризуются уменьшением концентрации парамагнитных центров. Это свидетельствует о снижении интенсивности асфальтеногенеза и интенсивности старения битумоминеральной композиции.

Ключевые слова: битумоминеральные композиции, асфальтеногенез, асфальтены, электронный парамагнитный резонанс, парамагнитные центры, дисперсная арматура, нефтяной битум, волокнистые сорбенты, избирательная фильтрация, адсорбционные слои нефтяного битума

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокшин Р.И. Влияние технологии производства на асфальтеногенез в дисперсно-армированных битум-

моминеральных композициях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 178–188.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-178-188

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

MANUFACTURE-AFFECTED ASPHALTENE GENESIS IN DISPERSION HARDENED BITUMEN-MINERAL COMPOSITIONS

Abstract. The paper focuses on increasing the service life of the road pavement layers made of dispersion hardened organomineral mixtures through the aging intensity reduction of organic binder, which begins at the preparation stage of these mixtures and lasts during the structural layer operation. The organic binder generates adsorption-volute shells on the surface of mineral materials, which become more viscous and acquire increased brittleness. Crack formation becomes more intensive, pavement designed and built in accordance with the requirements destroys. Dispersion hardening of the pavement structural layers with chemical fibers from spent sorbents containing oil products, can be used to partially solve this problem.

The purpose of the work is to study the aging intensity of the binder in organomineral mixtures using electron paramagnetic resonance methods. The aging intensity of the organic binder is evaluated by the concentration of paramagnetic centers, since asphaltene are almost one hundred percent concentrate of paramagnets, which can serve as an indicator of the aging intensity of the petroleum dispersion system.

It is shown that dispersion hardening of the pavement layers by chemical fibers from spent sorbents containing absorbed oil products, decreases the concentration of paramagnetic centers, which indicates to the higher concentration of asphaltene, which, in turn, means a decrease in the aging intensity of the oil dispersion system.

Keywords: electronic paramagnetic resonance, free radicals, fibrous sorbents, petroleum bitumen components, clogged pores, adsorption layer, mineral material

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Vliyanie tekhnologii proizvodstva na asfal'tenogenez v dispersno-aromirovannykh bitumomineral'nykh kompozitsiyakh [Manufacture-affected asphaltene genesis in dispersion hardened bitumen-mineral compositions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 178–188.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-178-188

Характерной особенностью битумоминеральных композиций (БМК) является их принадлежность к термопластичным материалам, что предопределяет как преимущества, так и недостатки их свойств. К основным преимуществам относят технологичность производства БМК, технологичность устройства конструктивных слоев дорожных одежд, простоту содержания и ремонта слоев из БМК. Основные недостатки БМК вытекают из свойств нефтяного битума, используемого в качестве вяжущего, или основного компонента, применяемого для получения органического вяжущего (эмульсий, мастик, композиционных вяжущих и т. д.). Использование нефтяного битума в составе БМК приводит к тому, что в летний период, при высоких положительных температурах, когда покрытие дорожной одежды нагревается до 60 °С и более, происходит существенное снижение сдвигоустойчивости конструктивного слоя. Под

воздействием подвижных нагрузок накапливаются необратимые сдвиговые деформации, что проявляется в колееобразовании, возникновении волнообразных наплывов, волн, других деформаций и даже разрушений. Это связано с тем, что адсорбционно-сольватные оболочки органического вяжущего, обеспечивающие связь между частицами минерального материала, включающие масла, смолы и асфальтены, под воздействием положительных температур становятся эластичными и слабо сопротивляются сдвиговым нагрузкам. Чем менее вязкий битум, тем интенсивнее протекают процессы, сопровождающиеся сдвиговыми деформациями в конструктивных слоях из БМК. В зимний период, при значительных отрицательных температурах, возможно образование трещин вследствие снижения эластичности пленок битума на поверхности минеральных материалов, что связано со старением битумо-минеральных композиций. Причинами старения являются физико-химические процессы, начинающиеся при производстве битумо-минеральных композиций и продолжающиеся в течение всего времени эксплуатации конструктивных слоев из этих материалов. К основным причинам старения можно отнести изменения фракционного состава органического вяжущего под влиянием природно-климатических факторов и процесс избирательной диффузии (фильтрации) компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов [1]. Профессор Л.Б. Гезенцев отмечал: «...изменение компонентного состава приповерхностных слоев битума представляет собой одну из форм интенсивного старения битума, характерную для битумо-минеральных композиций...» [2, 3].

Природно-климатические факторы активно воздействуют на процессы старения битумо-минеральных композиций. Происходят изменения структуры битума, в ходе которых масла преобразуются в смолы, а старение смол сопровождается их преобразованием в асфальтены [4–7]. Эти преобразования являются необратимыми. Главную роль в них играют кислород воздуха, температура конструктивного слоя, испарения легких фракций мальтеновой части битума. Катализаторами этого процесса являются оксиды железа и алюминия (Al_2O_3 , Fe_2O_3) [8–11]. Назовем процесс роста содержания асфальтенов в битуме, протекающий при старении, асфальтеногенезом. В результате асфальтеногенеза содержание низкомолекулярных фракций (масла и смолы) уменьшается, а содержание высокомолекулярных фракций (асфальтенов) увеличивается, что отражено в работах D. Lesueur [12], F. Farcas [13], J.C. Petersen [14, 15], M.N. Siddiqui и M.F. Ali [16, 17], Y. Qi и F. Wang [18–20], F.A. Reyes с соавторами [21, 22] и многих других.

Указанные процессы приводят к изменению прочностных свойств битумо-минеральных композиций: повышаются прочность и модуль упругости, относительное удлинение при разрыве. Достигнув экстремума к 7–12 годам эксплуатации, они снижаются, и начинается интенсивный процесс разрушения [23].

Авторами работы [24] доказано, что в процессе старения при различных температурах содержание асфальтенов может изменяться от 17,89 до 40 %.

Потеря низкомолекулярных фракций приводит к тому, что адсорбционные слои нефтяного битума, которые обеспечивают когезионную связь между зернами минерального материала, теряют эластичность. Они становятся более хрупкими, особенно при отрицательных температурах. Трещиностойкость

конструктивных слоев дорожных одежд из битумоминеральных композиций снижается. В трещины проникает вода. Лед, образовавшийся при отрицательных температурах, расширяется, что приводит к разрушению конструктивных слоев и сокращению сроков их службы.

Из вышесказанного следует, что для уменьшения интенсивности старения конструктивных слоев дорожных одежд из органоинеральных смесей следует снизить интенсивность асфальтогенеза и нейтрализовать полуторные оксиды, катализирующие старение органического вяжущего. Это может быть достигнуто путем снижения интенсивности избирательной фильтрации, что, в свою очередь, снизит интенсивность фракционирования нефтяного битума. Ограничить избирательную фильтрацию (либо вовсе ее прекратить) возможно при использовании технологии дисперсного армирования [25–31]. Для снижения стоимости технологии предпочтительно применять отходы – отрезки 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 и т. д. [32]. При реализации предложенной автором [32] технологии возникает возможность двухстадийной обработки поверхности минеральных материалов органическими вяжущими.

Как показано в работе [32], на первой стадии целесообразно использовать органические вяжущие, обладающие высокой адгезией, на второй стадии – эффективной когезией. Именно поэтому при производстве органоинеральных композиций в минеральный материал необходимо вводить сначала дисперсную арматуру из волокнистых сорбентов. Содержащиеся в них собранные при ликвидации аварий органические материалы: нефть, мазут, смолы различного происхождения, сланцевые и каменноугольные фусы и т. д. – обладают высокой активностью и, вступая в химическое взаимодействие с поверхностями минеральных материалов, создают хемосорбционные связи, а проникая в поры и капилляры минеральных материалов, коагулируют их. При этом происходит модифицирование поверхностей минеральных материалов.

На второй стадии в смесь минерального материала с дисперсной арматурой вводится нефтяной битум. В связи с тем, что поры и капилляры минерального материала уже заполнены органическими материалами, вводимыми на первой стадии, процесс фракционирования компонентов нефтяного битума не будет иметь места. Следовательно, концентрация асфальтенов на поверхности минеральных материалов увеличиваться не будет, что является одной из форм снижения интенсивности асфальтогенеза, характеризующего переход масел в смолы, а смол в асфальтены в процессе старения конструктивного слоя. Кроме того, адсорбционно-сольватные оболочки битума не будут обедняться низкомолекулярными компонентами, по этой причине интенсивность асфальтогенеза также будет замедлена. Снижение интенсивности процесса фракционирования битума и процесса асфальтогенеза обеспечит эластичность адсорбционно-сольватных оболочек битума при отрицательных температурах и повысит трещиностойкость конструктивного слоя. Наличие же дисперсной арматуры увеличит сдвигоустойчивость конструктивного слоя дорожной одежды из битумоинеральных

материалов при высоких положительных температурах в летний период. В целом, вышеуказанные процессы структурообразования дисперсно-армированных битумо-минеральных композиций приведут к повышению сроков службы конструктивных слоев, выполненных из этих материалов.

В результате реализации предложенной технологии на поверхности минеральных материалов образуется суперпозиция (наложение) двух слоев органических вяжущих. После первой стадии на поверхности минерального материала образуется первый адсорбционный слой (слой вяжущего, содержащегося в волокнистых сорбентах), обеспечивающий высокую адгезию, кольтматацию пор и исключение фракционирования битума (избирательную фильтрацию) на второй стадии. После второй стадии обработки на первый слой происходит наложение второго слоя – слоя битума. Этот слой битума обладает более высокой водостойкостью и защищает первый слой от воздействия влаги.

Выдвинутые теоретические предположения были проверены с применением методов электронного парамагнитного резонанса и люминесцентной битумологии.

Метод люминесцентной битумологии был применен для исследования процессов избирательной фильтрации компонентов органических вяжущих при их взаимодействии с поверхностью минеральных материалов [33]. Метод опирается на различия в характере люминесценции компонентов органических вяжущих под воздействием ультрафиолетовых лучей. Каждый компонент органического вяжущего люминесцирует своим цветом.

Авторами были исследованы тонкопористые известняки при их одностадийной обработке нефтяным битумом и тонкопористые известняки, подвергшиеся двухстадийной обработке – сначала сланцевой смолой, а затем нефтяным битумом [32]. Сланцевая смола была получена путем центрифугирования волокнистых сорбентов после их использования для ликвидации разлива сланцевых фусов.

Исследования расколотой щебенки из тонкопористого известняка с адсорбционной оболочкой из битума показали, что на поверхности щебенки адсорбируются преимущественно асфальтены. Смолы располагаются в слое, близком к поверхности. В то же время масла проникают вглубь тонкопористого материала. Наблюдается картина фракционирования (избирательной фильтрации) нефтяного битума.

Исследования щебенки, обработанной сланцевой смолой, показали, что процессы избирательной фильтрации также имеют место. Но компоненты сланцевой смолы проникают в минеральный материал глубже, люминесценция менее яркая, менее насыщена красками.

Исследования тонкопористого известняка, подвергшегося двухстадийной обработке (сначала сланцевой смолой, а затем нефтяным битумом), показали, что избирательная фильтрация компонентов нефтяного битума в поры и капилляры отсутствует, что является закономерным процессом, поскольку они уже заполнены компонентами сланцевой смолы на первой стадии обработки.

Применение методов люминесцентной битумологии позволило установить, что реализация технологии дисперсного армирования битумо-минеральных композиций, предусматривающая введение в смесь волокон из отработанных

сорбентов, содержащих регулируемое количество собранных нефтепродуктов, позволяет предотвратить либо снизить интенсивность избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов. Тем самым снижается интенсивность одной из форм асфальтогенеза.

Влияние процессов старения асфальтового вяжущего на интенсивность асфальтогенеза было исследовано с использованием методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-спектроскопии).

В связи с тем, что асфальтены являются почти 100%-м концентратом парамагнитных центров [34–36], изменение концентрации парамагнитных центров в дисперсной битумо-минеральной композиции может свидетельствовать о содержании асфальтенов (а значит, об изменении интенсивности процесса асфальтогенеза) и быть показателем интенсивности процесса старения дисперсной битумо-минеральной композиции.

Для исследования использовался радиоспектрометр RADIOPAN SE/X-25-44 с рубиновыми стержнями в качестве квазивнутреннего эталона. Рабочий режим оборудования: частота – 9 ГГц, длина волны – 3,2 см. Исследовались минеральные материалы, представленные гранитом и известняком. Одностадийная обработка осуществлялась нефтяным дорожным битумом Ачинского НПЗ (марка БНД 90/130), двухстадийная – сначала сырой нефтью Первомайского месторождения Томской области, полученной после центрифугирования сорбентов, а после – указанным выше битумом.

Изучались смеси, полученные сразу после перемешивания, а также смеси, подвергнутые старению в термостабилизированной камере в течение шести часов. Результаты исследований представлены в таблице.

Зависимость концентрации парамагнитных центров от состава битумо-минеральных композитов и технологии их производства

№ п/п	Состав битумо-минерального композита и технология его получения	Количество парамагнитных центров в БМК, г ⁻¹	
		до старения	после старения
1	Гранит + Битум (одностадийная)	0,22·10 ¹⁷	0,7·10 ¹⁷
2	Гранит + Нефть + Битум (двухстадийная)	0,19·10 ¹⁷	0,26·10 ¹⁷
		Снижение на 14 %	Снижение на 63 %
3	Известняк + Битум (одностадийная)	3,6·10 ¹⁷	6,4·10 ¹⁷
4	Известняк + Нефть + Битум (двухстадийная)	0,4·10 ¹⁷	4,7·10 ¹⁷
		Снижение на 89 %	Снижение на 26 %

Анализируя данные, представленные в таблице, можно сделать следующие выводы. При введении нефти, полученной после центрифугирования дисперсной арматуры, снижается концентрация парамагнитных центров в минеральных материалах, представленных как кислыми (гранит), так и карбонатными (известняк) породами, сразу после приготовления БМК. Следовательно, уже на стадии производства технология дисперсного армирования отработана

ными сорбентами позволяет снизить интенсивность асфальтогенеза в кислых породах на 14 %, а в карбонатных – на 89 %.

Процессы старения оказали очень существенное влияние на концентрацию парамагнитных центров и в гранитной, и в известняковой БМК. Однако общее количество парамагнитных центров снизилось в гранитном композите с $0,7 \cdot 10^{17}$ до $0,26 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$, фактически на 63 %. В то же время в известняковом композите снижение концентрации достигло только 26 %. При этом необходимо заметить, что интенсивность образования парамагнитных центров в процессе старения в известняковом композите существенно выше в случае введения нефти, поскольку изначальное снижение концентрации парамагнитных центров достигало 89 %. Это согласуется с результатами исследований, представленных в работах [22, 35], где отмечено, что чем выше первоначальная концентрация в битуме асфальтенов, тем меньше изменяется в процессе старения его химический состав.

Резюмируем, что использование люминесцентной битумологии позволило подтвердить вывод об эффективности дисперсного армирования битумо-минеральных композиций отрезками волокон, содержащих адсорбированные отходы нефтепродуктов, в отношении дальнейшего старения БМК благодаря снижению интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов. Это является одной из форм снижения интенсивности процесса образования асфальтенов (асфальтогенеза). Методом электронного парамагнитного резонанса доказано, что смеси, приготовленные по предлагаемой технологии, подвергшиеся старению в климатической камере, имеют более низкую интенсивность образования парамагнитных центров. Это также свидетельствует о более низкой интенсивности перехода смол в асфальтены, а следовательно, более низкой интенсивности процесса асфальтогенеза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гезенцев Л.Б., Слива Г.Я. Избирательная фильтрация битумов при взаимодействии с минеральными порошками // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 98–105.
2. Гезенцев Л.Б., Горельшев 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.
3. Гезенцев Л.Б., Колбанев И.В., Рвачева Э.М. Механо-химические процессы в битумо-минеральных системах // Автомобильные дороги. 1971. № 2. С. 6–9.
4. Бабаев В.И. Старение асфальтобетона в условиях юга России // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 21.
5. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
6. 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.
7. Давыдова А.Р. Исследование процесса старения битума под влиянием различных факторов // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 48–54.
8. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. Москва : Транспорт, 1983. С. 129.
9. Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭЦ : справочное пособие. Москва : Энергоиздат, 1985. 285 с.
10. Методические рекомендации по технологии применения в асфальтобетоне отвалных золошлаковых смесей теплоэлектростанций. Москва : СоюздорНИИ, 1978. 23 с.

11. Чистяков Б.З., Лялинов А.Н. Использование минеральных отходов промышленности. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1984. 150 с.
12. 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). P. 42–82.
13. Sá da Costa M., Farcas F., Santos L.F., Eusébio M.I., Diogo A.S. Chemical and Thermal Characterization of Road Bitumen Ageing // *Materials Science Forum*. 2011. V. 636–637. P. 273–279. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.273>
14. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art // *Transportation Research Board*. Washington, DC, 999. 1984. P. 13–30.
15. 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.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts // *Fuel*. 1999. № 78 (9). P. 1005–1015.
17. 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). P. 1407–1416.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Reyes F.A., Daza C.E., Rondon H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column // *Revista EIA*. 2012. V. 17. P. 47–56.
22. Глотова Н.А., Горшков 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.
23. Слободчиков Ю.В. Исследование влияния условий эксплуатации на надежность битумо-минеральных покрытий автомобильных дорог Северного Казахстана : автореферет диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1972. 32 с.
24. 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.
25. Пшеничных О.А., Скорик Д.С. Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетонов в дорожном строительстве // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. Вып. 141. С. 121–127.
26. Алиахван 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.
27. Пшеничных О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетонов // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. Вып. 143. С. 41–44.
28. Мерзликин А.Е., Гамеляк И.П. Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно-армированного асфальтобетона // *Труды Союздорнии*. Сер. Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд. 1990. С. 17–25.
29. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report // *Transp. Res. Rec.* 1983. № 916. P. 6–18.
30. 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.
31. 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.

32. 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.
33. Флоровская В.Н., Овчинникова Л.И. Люминесцентная микроскопия битуминозных веществ. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 80 с.
34. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения 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.

REFERENCES

1. Gezentsvei L.B., Sliva G.Ya. Izbiratel'naya filtratsiya bitumov pri vzaimodejstvii s mineral'nymi poroshkami. [Selective filtration of bitumen in interacting with mineral powders]. *Trudy Soyuzdornii*. 1971. V. 44. Pp. 98–105. (rus)
2. Gezentsvei L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavsky A.M., Korolev I.V. Dorozhnyj asfal'tobeton [Asphalt concrete]. 2nd ed., Moscow: Transport, 1985. 350 p. (rus)
3. Gezentsvei L.B., Kolbanev I.V., Rvacheva E.M. Mekhano-khimicheskie protsessy v bitumomineral'nykh sistemakh [Mechano-chemical processes in bitumen mineral systems]. *Avtomobilnye dorogi*. 1971. No 2. P.6–9. (rus)
4. Babaev V.I. Starenie asfal'tobetona v usloviyax yuga Rossii [Aging of asphalt concrete in the south of Russia]. *Avtomobilnye dorogi*. 1994. No. 3. P. 21. (rus)
5. Bakhrakh G.S. Otsenka termookislitel'noi stabil'nosti asfal'tovykh materialov s uchetom roli kontaktnykh vzaimodeystvii [Assessment of thermal-oxidative stability of asphalt materials and the role of contact interactions]. *Trudy Soyuzdornii*. 1975. V. 79. Pp. 132–140. (rus)
6. Davydova A.R., Gladyr S.A., Telkova T.N. Issledovanie izmenenij, protekayushhix v bitumax pri ix glubokom okislenii [Study of changes in bitumen during deep oxidation]. *Trudy Soyuzdornii*. 1977. V. 100. Pp. 4–12. (rus)
7. Davydova A.R. Issledovanie processa stareniya bituma pod vliyaniem razlichnykh faktorov [Bitumen aging process under the influence of various factors]. *Trudy Soyuzdornii*. 1971. V. 44. Pp. 48–54. (rus).
8. Grushko I.M., Korolev I.V., Borshh I.M., Mishhenko G.M. Dorozhno-stroitel'nye materialy [Road building materials]. Moscow: Transport, 1983. 129 p. (rus)
9. Melentev V.A. Sostav i svoystva zoly i shlaka TETz: Spravochnoe posobie [Composition and properties of ash and slag from thermal power plants: Reference guide]. Moscow: Energoizdat, 1985. 285 p. (rus)
10. Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologii primeneniya v asfal'tobetone otval'nyx zoloshlakovykh smesey teploe'lektrostancij [Guidelines for using waste ash and slag mixtures from thermal power plants in asphalt concrete]. Moscow: SoyuzdorNII, 1978. 23 p. (rus)
11. Chistyakov B.Z., Lyalinov A.N. Ispol'zovanie mineral'nyx otxodov promy'shlennosti [Industrial mineral waste application]. Leningrad: Stroiizdat, 1984. 150 p. (rus)
12. 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. No. 145 (1-2). Pp. 42–82.
13. Sá da Costa M., Farcas F., Santos L.F., Eusébio M.I., Diogo A.S. Chemical and thermal characterization of road bitumen ageing. *Materials Science Forum*. 2011. V. 636–637. Pp. 273–279. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.273>
14. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art. Washington: Transportation Research Board, 1984. Pp. 13–30.
15. 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. 68 p.
16. Siddiqui M.N., Ali M. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui. *Fuel*. 1999. No. 78 (9). Pp. 1005–1015.

17. Siddiqui M.N., Ali M. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt. *Fuel*. 1999. No. 78 (12). Pp. 1407–1416.
18. 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). Pp. 283–299.
19. 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). Pp. 263–274.
20. 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). Pp. 275–286.
21. Reyes F.A., Daza C.E., Rondon H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column. *Revista ELA*. 2012. V. 17. Pp. 47–56.
22. Glotova N.A., Gorshkov V.S., Kats B.I. Izmenenie reologicheskikh svoystv i khimicheskogo sostava bitumov pri starenii [Changes in rheological properties and chemical composition of bitumen during aging]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1980. No 4. Pp. 47–49. (rus)
23. Slobodchikov Yu.V. Issledovanie vliyaniya uslovij e'kspluatatsii na nadezhnost' bitumo-mineral'ny'x pokry'tij avtomobil'ny'x dorog Severnogo Kazaxstana: Avtoref. kand. dissert. [The influence of operating conditions on reliability of bitumen-mineral coatings of highways in Northern Kazakhstan. PhD Abstract]. Moscow. 1972. 32 p. (rus)
24. 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, No. 2. Pp. 9–15.
25. Pshenichnykh O.A., Skorik D.S. Opyt primeneniya dispersno-armirovannykh asfal'tobetonov v dorozhnom stroitel'stve [Experience of using dispersion hardened asphalt concretes in road construction]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 141. Pp. 121–127. (rus)
26. Alshakhvan A., Kalgin Yu.I. Uluchshenie strukturno-mekhanicheskikh svoystv teplogo asfal'tobetona metodom polimerno-dispersnogo armirovaniya [Improving structural and mechanical properties of warm asphalt concrete by polymer dispersion hardening]. *Proektirovanie I stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonnelei*. 2021. No. 61. Pp. 53–61. (rus)
27. Pshenichnykh O.A. Deformatsionno-prochnostnye kharakteristiki dispersno-armirovannykh asfal'tobetonov [Deformation strength properties of dispersion hardened asphalt concrete]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 143. Pp. 41–44. (rus)
28. Merzlikin A.E., Gamelyak I.P. Ispytaniya konstrukcij dorozhnykh odezhd dlya ocenki effektivnosti primeneniya dispersno armirovannogo asfal'tobetona [Effectiveness of pavement structures of dispersion hardened asphalt concrete]. *Trudy Soyuzdormii. Konstruirovanie, raschet i ispy'tanie dorozhnykh odezhd*. 1990. Pp. 17–25. (rus)
29. 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.
30. 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. No. 650. P. 77–78.
31. 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.
32. Lukashevich V.N. Uvelicheniya sroka sluzhby asfal'tobetonnykh pokrytii za schet dvukhstadiinogo vvedeniya organicheskikh vyazhushchikh v protsesse proizvodstva asfal'tobetonnykh smesei [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)
33. Florovskaya V.N., Ovchinnikova L.I. Lyuminescentnaya mikroskopiya bituminoznykh veshchestv [Luminescence microscopy of bituminous substances]. Moscow, 1970. 80 p. (rus).
34. Wertz J.E., Bolton J.R. Teoriya i prakticheskie prilozheniya primeneniya metoda EPR [Electron spin resonance: Elementary theory and practical applications]. Moscow: Mir, 1975. 368 p. (transl. from Engl.)
35. Unger F.G., Andreeva L.N. Fundamental'nye aspekty himii nefi. Priroda smol i asfal'tenov [Fundamental aspects of oil chemistry. The nature of resins and asphaltenes]. Novosibirsk: Nauka, 1995. 192 p. (rus)

36. Zhelezko E.P., Pechenyj B.G. O kinetike obrazovaniya i rekombinacii svobodny'x radikalov v bitumax [Kinetics of formation and recombination of free radicals in bitumen]. *Trudy Soyuzdormii*. 1970. No. 46. Pp. 137–142. (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

Мокшин 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 Assiatnt, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mokshinroman@mail.ru