

УДК 691.168

Анализ возможности использования нефтяных асфальтитов в производстве углеродных волокон для модификации дорожных покрытий

Ю. И. Макаров¹, К. Ф. Исламов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета (КФУ), Россия, 423800, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 13

Для цитирования: Макаров Ю. И., Исламов К. Ф. Анализ возможности использования нефтяных асфальтитов в производстве углеродных волокон для модификации дорожных покрытий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 587–595. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-587-595

Аннотация

В статье рассмотрены асфальтиты как природного происхождения, так и возникающие при переработке нефти, которые в настоящее время используются в различных отраслях благодаря уникальным свойствам: термопластичности, высокой удельной поверхности, наличию полярных групп и способности стабилизировать другие системы. **Цель:** рассмотреть возможность использования асфальтитов в производстве углеродных волокон, которые могут применяться как дисперсно-армирующие добавки, улучшающие физико-механические свойства асфальтобетонов. **Методы:** в работе использованы методы денсиметрического, микроскопического, а также группового химического и элементного анализа. **Результаты:** проведен сравнительный анализ физико-механических свойств и химического состава природного и нефтяного асфальтитов. Представлены графики зависимостей: температуры размягчения асфальтита — от условий деасфальтизации, выхода асфальтита — от температуры процесса, температуры размягчения пека — от температуры и продолжительности термообработки. **Практическая значимость:** асфальтиты используются в модификации битумных вяжущих, буровых растворах, производстве клеев, теплоизоляции и во многих других производствах, а также представляют интерес для получения углеродных материалов как модифицирующих добавок в асфальтобетонах.

Ключевые слова: асфальтиты, асфальтены, углеродные волокна, асфальтобетоны, дисперсно-армирующая структура

Введение

Асфальтиты как одна из производных нефти встречаются в виде пластовых и жилообразных залежей в ряде месторождений России и используются в производстве строительных изделий, таких как лаки, клеи, теплоизоляционные материалы и др.

В настоящее время способы углубленной переработки нефтяного сырья, включая тяже-

лые остатки, хорошо освещены в отечественной литературе. Один из них был разработан в конце прошлого века Башкирским научно-исследовательским институтом по переработке нефти — это процесс Добен [1, 2], позволяющий достаточно четко выделить асфальто-смолистые вещества из нефтяных остатков.

Основным назначением этого процесса являются выделение деасфальтизата и его

дальнейшая гидрогенизационная переработка с целью получения моторных или котельных топлив. В качестве растворителя при деасфальтизации применяется легкий бензин (начало кипения 20–24 °С, конец кипения 60–62 °С). В зависимости от качества нефтяных остатков объемная кратность разбавления бензином составляет от 3 до 5. Процесс проводится при температуре 140 °С и давлении 1,95–2,45 МПа. При этом извлекаются тяжелые асфальто-смолистые вещества в виде асфальтенового концентрата, содержащего в своем составе до 70–85 % асфальтенов и 15–30 % адсорбированного на асфальтенах масла и смол.

Кроме того, вместе с асфальтеновым концентратом удаляется значительная часть золотобразующих металлов, содержащихся в составе исходного сырья. Поэтому асфальтиты, выделенные из тяжелых остатков переработки нефти, по сравнению с природными характеризуются повышенной плотностью, значительным содержанием золы, кислородных и азотистых соединений. Можно выделить следующие основные свойства нефтяных асфальтитов:

1. Объемная масса не выше 750 кг/м³.
2. Гранулометрический состав:
 - фракция < 1,0 мм не менее 75 %;
 - фракция > 2,8 мм не более 1,0 %;
 - зола до 5,0 %.
3. Растворимость в бензоле не менее 80 %.
4. Остаточное содержание бензина-растворителя не более 0,1 %.

В связи с этим выявлен ряд направлений применения нефтяных асфальтитов в разных отраслях производства.

Благодаря тому, что они используются в порошкообразном виде с различной температурой размягчения и меньшим содержанием нерастворимых примесей, получаемые из них строительные материалы характеризуются

улучшенными качественными и эксплуатационными показателями по сравнению с материалами, изготовленными на основе природных асфальтитов. Производство и потребление нефтяных асфальтитов выгодно тем, что их качество может регулироваться в процессе выпуска в зависимости от назначения. Этому посвящены работы как отечественных [3–5], так и зарубежных [6–9] исследователей. Кроме того, нефтяные асфальтиты по сравнению с природными имеют повышенную гидрофобность, высокое электрическое сопротивление и сравнительно низкий коэффициент теплопроводности. В силу указанных качеств они пригодны для широкого применения в строительной и дорожной индустрии.

Цель работы — рассмотреть возможность использования асфальтитов в производстве углеродных волокон, которые могут использоваться как дисперсно-армирующие добавки, улучшающие физико-механические свойства асфальтобетонов. Вопрос использования углеродных нанотрубок освещен в работах [10, 11], а также представлен в аналитическом исследовании А. А. Игнатьева [12] по обзору литературы о добавках в асфальтобетон. Способ изготовления битумного вяжущего на основе полимеров отражен в работе [13].

Сами по себе природные асфальтиты не превращают в углеродные волокна напрямую — в них слишком много примесей (сера, зола, разные минералы), которые испортят весь процесс. Но асфальтиты (или выделенные из них асфальтены) используют как *сырье* для получения прекурсоров — например, смесей с полиакрилонитрилом (ПАН-асфальт), которые затем уже перерабатывают в углеродные волокна. То есть асфальт здесь — не конечный армирующий агент, а строительный блок для классического углеродного волокна.

Методы и материалы

В качестве материалов использовались природные асфальтиты месторождения S, а также асфальтиты из остаточных продуктов первичной переработки нефти месторождений K и N (таблица).

Нефтяные асфальтиты являются одним из перспективных видов сырья для производства углеродных волокон — весьма ценного композиционного строительного материала. Так, углеродные материалы, полученные на основе асфальтитов-пеков, используются в качестве теплоизоляционного покрытия в вакуумных печах, работающих при высоких температурах, как наполнители термостойких пластмасс для улучшения механических и термических свойств, которые применяются

при изготовлении коррозионно-термостойких фильтровальных тканей, в производстве автомобильных покрышек, специальных электропроводов, кабелей и т. д.

Исходя из вышеизложенного, представляет интерес расширение выпуска углеродных волокон на основе нефтяного сырья, например для улучшения свойств асфальтобетонов.

В работе использованы методы денситрического, микроскопического, а также группового химического и элементного анализа.

Результаты

Асфальтит представляет собой концентрат асфальтенов (до 75%) в смеси с тяжелыми ароматическими углеводородами (до 10%) и смолами (до 12%). Это обуславливает

ТАБЛИЦА. Характеристика образцов природного (1) и нефтяного (2) асфальтитов

Показатели	1	2	
		А	Б
Плотность, кг/м ³	1020–1160	1110–1130	1095
Температура размягчения по КиШ, °С	170–220	150–180	132,5
Молекулярная масса, а. е. м.	1460	1400	1250
Групповой хим. состав, %:			
• масла (с ароматикой)	12,7–15,0	15,4–18,0	17,0
• смолы	21,1–27,3	10,0–12,0	13,0
• асфальтены	59,6–63,5	63,0–70,0	70,0
Элементный состав, %:			
• углерод	77,8–81,3	83,3–85,0	7,0
• водород	7,9–8,2	8,3–8,7	8,0
• сера	7,0–7,7	4,7–6,1	3,0
• азот	2,1–2,0	0,7–0,8	1,1
• кислород	0,5–0,6	0,17–1,5	0,9
Зольность, %	0,8–1,2	0,3–1,3	0,2
Содержание воды, %	до 30	отсутствует	
Содержание, 10 ⁻⁴ %:			
• ванадия	3500	—	700
• никеля	585	—	70

его сравнительно высокую плотность (1170–1180 кг/м³) и коксуюемость (45,6–50,5%).

Групповой химический состав асфальтита и, следовательно, его физико-химические свойства зависят от параметров режима процесса деасфальтизации [14]. Так, замечено, что температура размягчения асфальтита существенно возрастает с увеличением кратности разбавления и повышением температуры деасфальтизации (рис. 1), которая зависит от изменения содержания углеводородов и смол (рис. 2).

Следует также отметить, что асфальтит из дистиллятного крекинг-остатка отличается

от асфальтита, выделенного из остатков прямой перегонки нефти, более низкой температурой размягчения (на 34–76 °С), хотя они практически не различаются по содержанию асфальтенов. Это объясняется более низкой молекулярной массой групповых компонентов асфальтита, выделенного из крекинг-остатка, составляющей 700–800 а.е.м. (вместо 1200–1400 у прямогонных асфальтитов).

Исходя из вышеизложенного и учитывая высокое содержание асфальтитов в крекинг-остатках, в дальнейшем была исследована возможность использования асфальтита в качестве сырья для получения углеродных волокон.

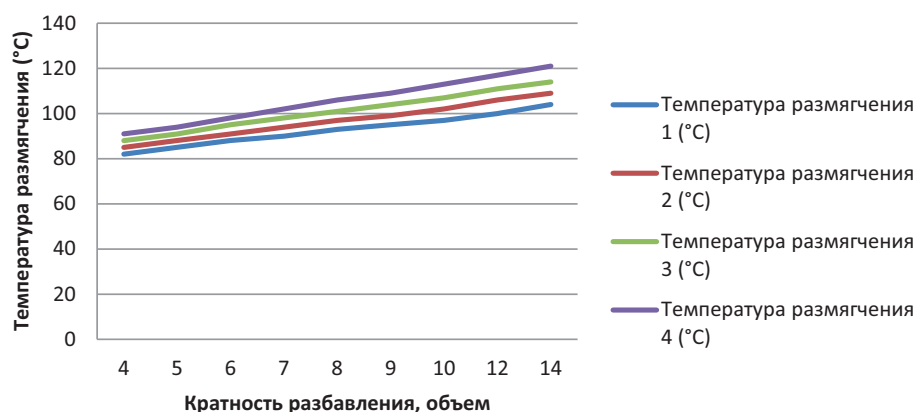


Рис. 1. Изменение температуры размягчения асфальтита в зависимости от условий деасфальтизации

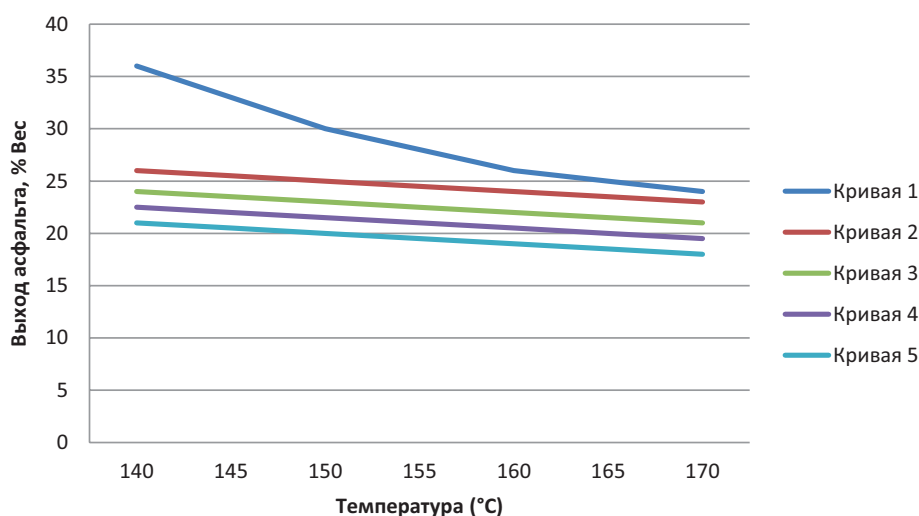


Рис. 2. Изменение выхода асфальтита в зависимости от температуры процесса

Углеродные волокна, полученные на основе асфальтитов, имеют достаточную для использования их в качестве подложки в производстве жаростойких нитей прочность на разрыв (450–500 МПа). Однако существенным недостатком исследованных образцов асфальтитов является то, что в вышеуказанных условиях получают углеродные волокна, спекшиеся на отдельных участках с образованием точечного контакта, что обуславливает большую обрывность моноволокон. Причиной спекания отдельных волокон также является наличие в пеке низкомолекулярных компонентов. Однако такие волокна представляют большой интерес при производстве углеродных нитей.

Указанные выше отрицательные явления в принципе могут быть устранены подбором соответствующих условий формования и других стадий (резкое снижение скорости подъема температуры при отверждении и карбонизации). Но при этом увеличивается продолжительность процесса. Следует указать и на сравнительно низкий выход углеродного волокна из асфаль-

тита (60–65 %), что также является следствием содержания в нем значительного количества низкомолекулярных веществ, которые на стадии карбонизации уходят из волокна в виде газов и паров.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в физико-химической обработке асфальтитов, направленной на удаление или вовлечение в реакцию поликонденсации низкомолекулярных компонентов с получением более высокоплавкого продукта (пека), обладающего лучшими волокнообразующими свойствами.

С этой целью в дальнейшем образцы асфальтитов были подвергнуты термообработке при температурах 250–300 °С и остаточном давлении $1,33 \cdot 10^8$ МПа на кубовой лабораторной установке. В указанных условиях протекают процессы испарения низкомолекулярных соединений и поликонденсации компонентов асфальтита, что в конечном итоге приводит к образованию более высокомолекулярного продукта — пека. Сказанное наглядно иллюстрируется на рис. 3.

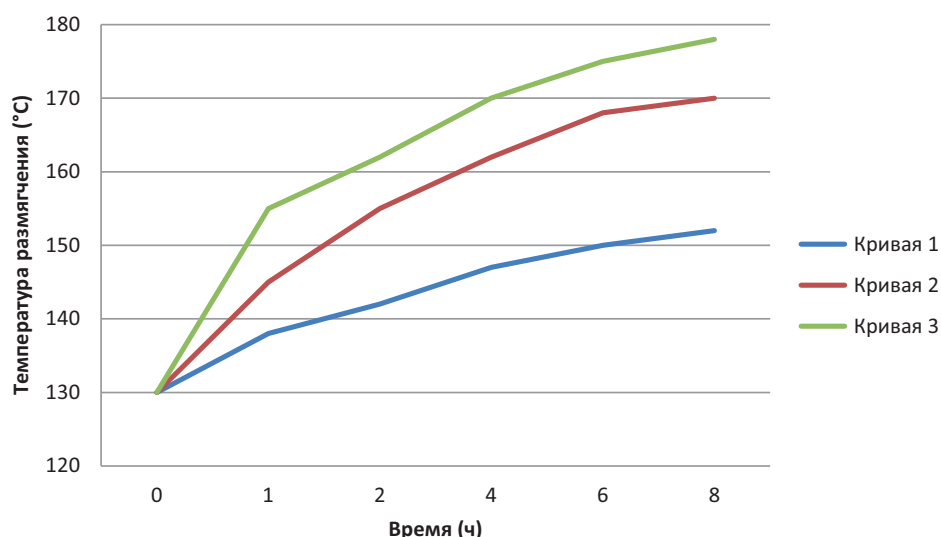


Рис. 3. Изменение температуры размягчения пека в зависимости от температуры и продолжительности термообработки

Дискуссия

На основании выполненных экспериментов были выбраны оптимальные условия деасфальтизации дистиллятного крекинг-остатка и термообработки асфальтита. Термообработка заметно снижает в асфальтите содержание средних и тяжелых ароматических углеводородов, что приводит к образованию карбенов и карбоидов, возрастанию плотности, молекулярной массы и содержания углерода.

Таким образом, исследованиями процесса термообработки асфальтитов показана возможность регулирования их качества в довольно широких пределах, а следовательно, вероятность подбора оптимального режима с точки зрения получения пригодного для производства углеродных волокон.

Технология получения углеродных волокон из расплавов сырья предусматривает обязательное применение фильтрации как при получении пека, так и при его использовании в производстве волокон. Фильтрация проводится с целью удаления из пека неплавких в условиях прядения компонентов (карбоидов, минеральных примесей и т. д.).

В результате исследований выбраны условия фильтрации высокоплавкого пека на основе асфальтита из дистиллятного крекинг-остатка (температура фильтрации 300 °С, кратность разбавления растворителем 4:1). В качестве фильтрующего материала использованы рукавные фильтры из полиимида. Микроскопическим анализом осадка получены данные по распределению частиц по размерам. В фильтрате отсутствовали частицы размером более 1 мк. Удалением растворителя из фильтрата (перегонкой при температуре порядка 380 °С и остаточном давлении $1,33 \cdot 10^8$ МПа в течение 6 часов) получен пек с улучшенными по сравнению с исходными качествами.

Организация производства высокоплавких пеков и углеродных волокон на основе асфальтитов, выделенных из тяжелых нефтяных остаточных продуктов, имеет большое значение. Техническая возможность и экономическая целесообразность использования нефтяных асфальтитов в строительной индустрии требует дальнейших исследований, так как широкое использование асфальтитов для этих целей сдерживается в основном из-за ограниченности объема их выпуска.

Заключение

Если рассматривать углеродные волокна в асфальтобетонах в качестве дисперсно-армирующих добавок, то можно отметить, что именно они признаны передовыми и перспективными материалами [15].

Углеродные волокна из асфальтитов в асфальтобетонной смеси образуют композит: битумная матрица плюс углеродные волокна — арматура. Волокна работают как каркас, улучшая прочность на растяжение и изгиб. Особенно ценно, что эффект заметен и при отрицательных температурах [16].

Стоит предположить с целью дальнейших исследований, что может повышаться водостойкость, теплостойкость, расширяться температурный диапазон укладки. К тому же углеродные материалы (волокна, нанотрубки) могут участвовать в системах самовосстановления: при локальном нагреве (например, микроволновым излучением) они помогают «залечить» микротрещины.

В целом можно отметить, что проведенные исследования — направление перспективное: оно позволяет утилизировать тяжелое нефтяное сырье и создавать более долговечные дорожные покрытия.

Однако следует учитывать, что от исходного состава асфальтитов (содержания серы,

металлов) зависит итоговая пригодность сырья для получения качественного прекурсора, а перед масштабным внедрением нужны дополнительные исследования, например, как разные типы асфальтитов влияют на совместимость с битумной матрицей.

Список источников

1. Использование продуктов процесса Добен / В. В. Фрязинов [и др.] // Труды БашНИПИнефть, 1972. Вып. 10. С. 45–50.
2. Деасфальтизация тяжелых остатков бензином / А. С. Эйгенсон [и др.] // Труды БашНИПИнефть, 1972. Вып. 10. С. 55–60.
3. Структура асфальтенов каменноугольного пека / С. А. Созинов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 6. С. 603–608.
4. Каширцев В. А. Углеводороды, окклюдируемые асфальтенами // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1211–1219.
5. Еременко А. Е. Разработка технологии переработки вторичных тяжелых нефтяных остатков для производства пеков: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2025. 157 с.
6. Amara B., Kocaefe D., Kocaefe Y. A Review of the Studies on the Utilization of Petroleum Pitch and Its Blends with Coal Tar Pitch for Carbon Anode Production in Aluminum Industry // Next Research. 2025. Pp. 100–250.
7. Osborn J. D. Port Bolivar Pavement Material: U.S. Patent No. 6 346 561 B1. Publ. 12 Feb. 2002.
8. Ostermeyer L. F. Engineered Modified Asphalt Cement: U.S. Patent No. 5 221 703. Priority 14 May 1992, publ. 22 June 1993.
9. Composition Comprising a Concentrate of Natural Asphaltene in Fluxing Oil Suitable for Use in Preparing Asphalt Blends. Patent WO 2020/023 885 / Assignee unknown. Int. Filed 26 July 2019, publ. 30 Jan. 2020.
10. Ahmad M., Al-Dala'ien R., Beddu S., Itam Z. Thermo-Physical Properties of Graphite Powder and Polyethylene Modified Asphalt Concrete // Engineered Science. 2021. DOI: 10.30919/es8d569
11. Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete / H. Li [et al.] // Materials. 2019. Vol. 12. Art. № 1067. DOI: 10.3390/ma12071067
12. Игнатьев А. А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63). С. 14–30.
13. Мурузина Е. В., Ахметов Ф. М., Казанская Л. Ф. Разработка способа изготовления модифицированного битумно-полимерного вяжущего // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 190–197. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-190-197
14. Современные методы определения группового состава среднестиллятных нефтяных фракций / Э. С. Демиденко [и др.] // НефтеГазХимия. 2024. № 2. С. 44–52
15. Кенжегалиева А., Жамболова А., Онгарбаев Е. Модификация битумов и асфальтобетонов углеродными наноматериалами: краткий обзор // Горение и плазмохимия. 2024. № 22 (2). С. 109–122. DOI: 10.18321/cpc22(2)109-122
16. Шеховцева С. Ю., Высоцкая М. А. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на температурный интервал работоспособности полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе // Известия КГАСУ. 2017. № 4 (42). С. 335–342.

Дата поступления: 03.07.2026

Решение о публикации: 08.08.2026

Контактная информация:

МАКАРОВ Юрий Иванович — старший преподаватель; makarov@pgups.ru

ИСЛАМОВ Камиль Фаритович — кандидат техн. наук, доцент; kam@kambox.ru

Analysis of the Possibility of Using Petroleum Asphaltites in the Production of Carbon Fibers for Modification of Road Surfaces

Yu. I. Makarov¹, K. F. Islamov²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint-Petersburg, 190031, Russia

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University, 13 Mira ave., Naberezhnye Chelny, 423800, Russia

For citation: Makarov Yu. I., Islamov K. F. Analysis of the Possibility of Using Petroleum Asphaltites in the Production of Carbon Fibers for Modification of Road Surfaces // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 587–595. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-587-595 (In Russian)

Abstract

The article discusses asphalts of both natural origin and those produced during oil refining, which are currently used in various industries due to their unique properties: thermoplasticity, high specific surface area, the presence of polar groups, and the ability to stabilize other systems. **Objective:** to explore the potential use of asphalts in the production of carbon fibers, which can be used as dispersed reinforcement additives that improve the physical and mechanical properties of asphalt concrete. **Methods:** the study employs densimetric, microscopic, and group chemical and elemental analysis methods. **Results:** a comparative analysis of the physical and mechanical properties and chemical composition of natural and petroleum asphalt samples was performed. Graphs were presented showing the changes in the softening temperature of asphalt depending on the deasphaltization conditions, the changes in the yield of asphalt depending on the process temperature, and the changes in the softening temperature of pitch depending on the temperature and duration of heat treatment. **Practical significance:** asphaltites are used in the modification of bituminous binders, drilling fluids, the production of adhesives, thermal insulation, and many other industries, and are also of interest for obtaining carbon materials as modifying additives in asphalt concretes.

Keywords: asphaltites, asphaltenes, carbon fibers, asphalt concretes, dispersed-reinforcing structure

References

1. Fryazinov V. V., et al. Ispolzovanie produktov processa Doben [Use of Doben Process Products], *Trudy BashNIPIneft [Proceedings of BashNIPIneft]*, 1972, iss. 10, pp. 45–50. (In Russian)
2. Eygenson A. S., et al. Deasfaltizaciya tyazhelyh ostatkov benzinom [Deasphalting of Heavy Residues with Gasoline], *Trudy BashNIPIneft [Proceedings of BashNIPIneft]*, 1972, iss. 10, pp. 55–60. (In Russian)
3. Sozinov S. A., et al. Struktura asfaltenov kamennougolnogo peka [Structure of Coal Tar Pitch Asphaltenes], *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya [Chemistry for Sustainable Development]*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 603–608. (In Russian)
4. Kashirtsev V. A. Uglevodorody, okklyudirovannye asfaltenami [Hydrocarbons Occluded by Asphaltenes], *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 1211–1219. (In Russian)
5. Eremenko A. E. Razrabotka tekhnologii pererabotki vtorichnyh tyazhelyh neftyanyh ostatkov dlya proizvodstva pekov: dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk [Development of a Technology for Processing Secondary Heavy Oil Residues for Pitch Production: Candidate of Technical Sciences Diss.], Ufa, 2025, 157 p. (In Russian)

6. Amara B., Kocaefe D., Kocaefe Y. A Review of the Studies on the Utilization of Petroleum Pitch and Its Blends with Coal Tar Pitch for Carbon Anode Production in Aluminum Industry, 2025, pp. 100–250.
7. Osborn J. D. Port Bolivar Pavement Material: U.S. Patent no. 6 346 561 B1, published February 12, 2002.
8. Ostermeyer L. F. Engineered Modified Asphalt Cement: U.S. Patent no. 5 221 703, priority May 14, 1992, published June 22, 1993.
9. Composition Comprising a Concentrate of Natural Asphaltene in Fluxing Oil Suitable for Use in Preparing Asphalt Blends. Patent WO 2020/023 885, assignee unknown, international application filed July 26, 2019, published January 30, 2020.
10. Ahmad M., Al-Dala'ien R., Beddu S., Itam Z. Thermo-Physical Properties of Graphite Powder and Polyethylene Modified Asphalt Concrete, Engineered Science, 2021. DOI: 10.30919/es8d569
11. Li H., et al. Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete, *Materials*, 2019, vol. 12, art. no. 1067. DOI: 10.3390/ma12071067
12. Ignatiev A. A. Dobavki v asfaltobeton. Obzor literatury [Additives in Asphalt Concrete. Literature Review], *Izvestiya KGASU [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering]*, 2023, no. 1 (63), pp. 14–30. (In Russian)
13. Muruzina E. V., Akhmetov F. M., Kazanskaya L. F. Razrabotka sposoba izgotovleniya modifitsirovannogo bitumno-polimernogo vyazhushchego [Development of a Method for Manufacturing Modified Bitumen-Polymer Binder], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, St. Petersburg, Petersburg State Transport University (PGUPS) Publishers, 2026, vol. 23, iss. 1, pp. 190–197. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-190-197 (In Russian)
14. Demidenko E. S., et al. Sovremennye metody opredeleniya gruppovogo sostava srednedistillyatnykh neftyanykh fraktsiy [Modern Methods for Determining the Group Composition of Middle Distillate Oil Fractions], *NefteGazoHimiya [Oil and Gas Chemistry]*, 2024, no. 2, pp. 44–52. (In Russian)
15. Kenzhegalieva A., Zhambolova A., Ongarbaev E. Modifikatsiya bitumov i asfaltobetonov uglerodnymi nanomaterialami: kratkij obzor [Modification of Bitumens and Asphalts with Carbon Nanomaterials: A Brief Review], *Gorenie i Plazmohimiya [Combustion and Plasma Chemistry]*, 2024, no. 22 (2), pp. 109–122. DOI: 10.18321/cpc22(2)109-122 (In Russian)
16. Shekhovtseva S. Yu., Vysotskaya M. A. Vliyaniye odnostennykh uglerodnkh nanotrubok na temperaturnyy interval rabotosposobnosti polimerno-bitumnykh vyazhushchih i asfaltobetonov na ih osnove [Influence of Single-Walled Carbon Nanotubes on the Temperature Range of Performance of Polymer-Bitumen Binders and Asphalt Concrete Based on Them], *Izvestiya KGASU [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering]*, 2017, no. 4 (42), pp. 335–342. (In Russian)

Received: July 03, 2026

Accepted: August 08, 2026

Author's information:

Yurij I. MAKAROV — Lecturer; makarov@pgups.ru
Kamil' F. ISLAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; kam@kambox.ru