

STUDY OF THE INFLUENCE OF MODIFIERS ON THE PROCESSES OF WETTING MINERAL FILLERS AND HYDROPHOBICITY OF BITUMEN FILMS

Dyuryagina A.N.^{1*}, Byzova Yu.S.¹, Salikova N.S.², Ostrovnoy K.A.¹, Gorshkova T.A.¹, Savel'yeva P.O.¹

¹JSC «North Kazakhstan University named after M. Kozybayev», Petropavlovsk, Kazakhstan

²Abay Myrzakmetov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan

e-mail: adyuryagina@inbox.ru

Abstract. *Introduction.* As you know, the quality of asphalt pavement often does not meet the stated standards. The low degree of adhesion between bitumen and mineral material is primarily due to the insufficient ability of bitumen to effectively wet the surface of crushed stone, especially of an acidic nature. *The aim of the work* is to establish the influence of various modifiers on the wetting processes of bitumen compositions. *The methods* of the work included the study of the wetting processes of mineral fillers of various nature depending on the quantitative polymer content in bitumen, as well as the study of the regularities of the effect of modifiers on the hydrophobicity of bitumen films. The wetting angle θ of the surface was experimentally determined by the lying drop method. *Results and discussion:* as follows from the analysis of the data obtained, the introduction of AG-4I most effectively contributes to the reduction of the surface tension σ_{lg} at the interface of the phases "bitumen composition – gray crushed stone". This is evidenced by the maximum wetting ability of the composition. *Conclusion:* it was found that of the two polymer modifiers, the spent sealing liquid AG-4I has the maximum effect on the wetting processes of mineral fillers and the hydrophobicity of bitumen films. A narrow range of modifier concentrations ($C_{\text{modif}} = 0.5\%$) was revealed, at which the water-repellent properties of bitumen compositions are enhanced. A hydrophobic effect comparable to AG-4I provides the introduction of 0.25% calcium chloride into the bitumen composition.

Key words: asphalt concrete compositions, mineral fillers, polymer modifiers, adhesion, wetting, hydrophobicity of bitumen films

Dyuryagina Antonina Nikolaevna

Candidate of chemical sciences, associate professor, Head of department of Chemistry and chemical technologies, e-mail: adyuryagina@inbox.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9109-8159>

Byzova Yuliya Sergeevna

Master of Chemical Sciences, PhD student, lecturer, e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2072-0238>

Salikova Natal'ya Semenovna

Candidate of chemical sciences, associate professor, Head of Research Institute of regional development, e-mail: natsal66@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0009-5826>

Citation: Dyuryagina A.N., Byzova Yu.S., Salikova N.S., Ostrovnoy K.A., Gorshkova T.A., Savel'yeva P.O. Study of the influence of modifiers on the processes of wetting mineral fillers and hydrophobicity of bitumen films. *Chem. J. Kaz.*, 2022, 3(79), 28-38. DOI: <https://doi.org/10.51580/2022-3/2710-1185.77>

<i>Ostrovnoy Kirill Aleksandrovich</i>	<i>Master of Chemical Sciences, senior lecturer, e-mail: kostrovnoy@mail.ru, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3309-0965</i>
<i>Gorshkova Tat'yana Aleksandrovna</i>	<i>Master student, e-mail: tanya.gorshkova.99@mail.ru, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8214-1100</i>
<i>Savel'yeva Polina Olegovna</i>	<i>Student, e-mail: polia.savielieva.01@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1081-2128</i>

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ СМАЧИВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ГИДРОФОБНОСТЬ БИТУМНЫХ ПЛЕНОК

Дюрягина А.Н.¹, Бызова Ю.С.¹, Саликова Н.С.², Островной К.А.¹, Горшкова Т.А.¹, Савельева П.О.¹*

¹НАО «Северо-Казахстанский Университет им. М.Козыбаева», Петропавловск, Казахстан

²Кокшетауский Университет им. Абая Мырзахметова, Кокшетау, Казахстан
E-mail: adyuryagina@inbox.ru

Резюме. *Введение.* Как известно, качество дорожного асфальтобетонного покрытия часто не соответствует заявленным нормам. Низкая степень сцепления между битумом и минеральным материалом обусловлена в первую очередь недостаточной способностью битума эффективно смачивать поверхность щебня, особенно кислой природы. *Цель* – установление влияния различных модификаторов на процессы смачивания битумных композиций. *Методология* работы включала исследование процессов смачивания минеральных наполнителей различной природы в зависимости от количественных содержаний полимера в битуме, а также изучение закономерностей влияния модификаторов на гидрофобность битумных пленок. Краевой угол смачивания θ поверхности экспериментально определялся методом лежащей капли. *Результаты и обсуждение:* как следует из анализа полученных данных, введение АГ-4И наиболее эффективно способствует уменьшению поверхностного натяжения $\sigma_{жст}$ на границе раздела фаз «битумная композиция – серый щебень». Об этом свидетельствует максимальный показатель смачивающей способности композиции. *Заключение:* установлено, что из двух полимерных модификаторов отработанная герметизирующая жидкость АГ-4И оказывает максимальное влияние на процессы смачивания минеральных наполнителей и гидрофобность битумных пленок. Выявлена узкая область концентраций модификатора ($C_{\text{модиф}}=0.5\%$), при которой водоотталкивающие свойства битумных композиций усиливаются. Сопоставимый с АГ-4И гидрофобизирующий эффект обеспечивает введение 0.25% хлорида кальция в состав битума.

Ключевые слова: асфальтобетонные композиции, минеральные наполнители, полимерные модификаторы, адгезия, смачивание, гидрофобность битумных пленок

<i>Дюрягина Антонина Николаевна</i>	<i>Кандидат химических наук, ассоциированный профессор</i>
<i>Бызова Юлия Сергеевна</i>	<i>Магистр химических наук, PhD докторант</i>
<i>Саликова Наталья Семеновна</i>	<i>Кандидат химических наук, ассоциированный профессор</i>
<i>Островной Кирилл Александрович</i>	<i>Магистр химических наук</i>
<i>Горшкова Татьяна Александровна</i>	<i>Магистрант</i>
<i>Савельева Полина Олеговна</i>	<i>Студент</i>

1. Введение

Для покрытия автомобильных дорог широко используют асфальтобетонные смеси, основными компонентами которых являются битум и минеральные наполнители. Качество битумов, используемых в дорожном строительстве, является недостаточным для создания долговечного асфальтобетонного покрытия. Применение низкокачественного битумного вяжущего в составе асфальтобетонной смеси приводит к снижению прочности и устойчивости дорожного полотна [1]. Наиболее эффективным методом улучшения качественных показателей битумных вяжущих является их модификация высокомолекулярными компонентами [2]. Добавка полимеров в битум позволяет значительно расширить интервал работоспособности вяжущего, увеличить его физико-механические и эксплуатационные характеристики, повысить водостойкость. Главной причиной повреждения асфальтобетонных покрытий можно считать недостаточную адгезию на границе раздела фаз между битумным вяжущим и твердой поверхностью минерального материала, что влечет малую гидрофобность асфальтобетонных покрытий [3].

Наличие в крупнотоннажных масштабах побочных продуктов пиролиза углеводородов, используемых в синтезе недорогих нефтеполимерных смол [4], а также промышленных отходов, в том числе отработанных герметиков, применяемых для защиты внутренней поверхности резервуарного оборудования и коммуникаций систем теплофикации [5], дает возможность использовать их в качестве дешевых, эффективных и конкурентоспособных модифицирующих добавок в составе битумных композиций [6-10]. В результате совмещения битума и полимера создается новая структура, которая приводит к изменению исходных свойств каждого компонента, и, как следствие, полярность композиции меняется [11-12]. Полярность композиции, в свою очередь, будет оказывать доминирующее влияние на удельную поверхностную энергию на межфазных границах: «жидкость-воздух», «твердая подложка-жидкость» и «твердая подложка-воздух». Соотношение поверхностных натяжений на указанных межфазных границах определяет, в соответствии с известным законом Юнга, краевой угол смачивания θ , который является количественной мерой данных процессов [13]. Таким образом, введение оптимальной концентрации модифицирующих аддитивов создает возможность улучшить смачивание твердой поверхности и повлиять на гидрофобные свойства битумных покрытий.

Анализ литературных источников позволяет заключить, что данные о модифицировании битумов неорганическими соединениями очень разрозненны и недостаточны для принятия научно-обоснованных решений как по определению номенклатуры и дозированию аддитивов, так и по прогнозированию их эффективности [14].

Научная новизна данного исследования состоит в установлении закономерностей влияния полимерных модификаторов на смачивающую способность битум-полимерного вяжущего по отношению к поверхности минеральных наполнителей различной природы, а также на гидрофобизирующий эффект битумно-полимерных пленок в составе асфальтобетонных смесей. Практическая ценность настоящей работы заключается, главным образом, во вторичном использовании отработанной герметизирующей жидкости, что открывает перспективы создания дешевых упрочняющих модификаторов в составе асфальтобетонных композиций.

2. Экспериментальная часть

Для проведения исследований использовали вязкий нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130 (СТ РК 1212-2003), минеральный наполнитель - щебень двух видов различной природы: аляскит (красный гранитный щебень) кислой природы и доломитизированный известняк (серый щебень) основной природы (СТ РК 1213-2003).

В качестве полимерных модификаторов применяли:

1. нефтеполимерную смолу (ТУ 2451-089-05766801-99);
 2. отработанную герметизирующую жидкость АГ-4И (ТУ 26-02-592-83).
- Неорганические аддитивы были представлены следующими солями:

1. хлорид натрия (ГОСТ 4233-77);
2. хлорид кальция (ТУ 6-09-5077-87);
3. хлорид железа (III) (ГОСТ 4147-74).

АГ-4И – продукт на основе высокомолекулярного полиизобутилена и нефтяных масел. Нефтеполимерная смола представляет собой продукт термической сополимеризации фракции жидких продуктов пиролиза С-9 (стирола, винил-толуола, дициклопентадиена, индена, α -метилстирола).

Состав и структурные характеристики образцов устанавливали методом ИК-спектроскопии (ИК-спектрометр «Инфралюм ФТ-08», диапазон волновых чисел $400-7800\text{ см}^{-1}$, спектральное разрешение не более $0,7\text{ см}^{-1}$, абсолютная погрешность $\pm 0,05\text{ см}^{-1}$). В ИК-спектре нефтеполимерной смолы присутствуют полосы, характерные для скелетных колебаний ароматического кольца (полосы $3020, 1600, 1490\text{ см}^{-1}$), наблюдаемые интенсивные полосы поглощения в области $700-800\text{ см}^{-1}$ свидетельствуют о содержании в смоле моно-, ди- и триалкилзамещенных ароматических соединений, полосы поглощения при 2930 и 1450 см^{-1} характерны для колебаний $=\text{CH}_2$ - группы, а при 1370 см^{-1} – для колебаний метильных групп. Таким образом, основная часть смолы представлена моно-, ди- и тризамещенными ароматическими углеводородами. Полоса при 1485 см^{-1} в ИК-спектре полиизобутилена в составе герметизирующей жидкости свидетельствует о деформационном колебании метиленовой группы. Дублет при 1370 и 1400 см^{-1} соответствует симметричному деформационному колебанию двух метильных групп. Расщепление вызвано резонансом и характерно для диметилзамещенной цепи.

Смачивающий эффект системы «битумное вяжущее-полимер» по отношению к поверхности двух разновидностей щебня (основной и кислой природы) определялся при 0.5-8.0 % (масс.). Гидрофобизирующий эффект полимерных модификаторов при смачивании битумных пленок водой был исследован в концентрационных пределах модификатора 0.5-2.0% (масс.). Влияние неорганических солей на гидрофобность битумных пленок оценивалось при содержании аддитива 0.25-2.0%. Измерения краевых углов смачивания водой поверхности битумных пленок осуществляли по методу лежащей капли [13].

3. Результаты и обсуждение

3.1 Исследование процессов смачивания минеральных наполнителей

Влияние количественных содержаний модифицирующих добавок на показатель смачивания щебня различной природы отражают зависимости, представленные на рис.1. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что поверхность щебня является лиофобной по отношению к битуму. В отсутствие модификаторов в битуме краевой угол θ на поверхности красного гранитного щебня составляет 126.87° , в случае с серым щебнем – 125.66° . Наибольшую смачивающую активность модификаторы проявляют по отношению к поверхности основной природы. Максимальный смачивающий эффект АГ-4И и НПС (минимумы на рисунке 1, кривые 1 и 4) приходится на их концентрации 1%. Сопоставление глубины двух экстремумов при данной концентрации ($C_{\text{модиф}}=1\%$) показывает, что наибольшее уменьшение θ происходит в присутствии АГ-4И. Так, при увеличении содержания АГ-4И в битуме от 0 до 1% краевой угол смачивания уменьшился на 12.44° (относительно базового варианта без АГ-4И) и составил 113.22° . При модифицировании битума нефтеполимерной смолой ($C_{\text{модиф}}=1\%$) фиксировали меньшее снижение краевого угла смачивания – на 7.95° (от 125.66° до 117.91°).

В отношении красного гранитного щебня смачивающая активность модифицирующих добавок оказалась хуже, чем на сером щебне (рисунок 1, кривые 2 и 3).

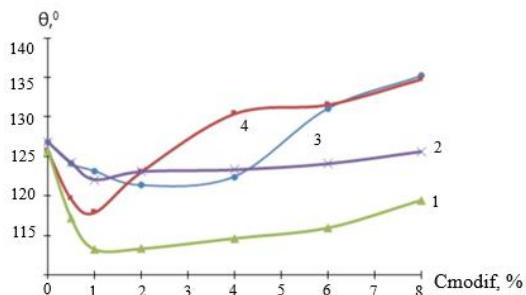


Рисунок 1 – Зависимость краевого угла смачивания поверхности основного (1,4) и кислого (2,3) щебня от концентрации модификатора: 1,2 – АГ-4И; 3,4 – НПС

Другая особенность данной поверхности – нивелирование разницы между смачивающей активностью АГ-4И и НПС, которая была установлена для поверхности основной природы. Максимум смачивающей активности НПС на поверхности красного гранитного щебня наблюдали при значительно больших содержаниях в битуме и одновременно на более широком концентрационном участке (от 2 до 4%). В этой области концентрации нефтеполимерной смолы краевой угол смачивания уменьшился на близкую к АГ-И величину ($\Delta\theta=4.26\div 5.54$) и составил $121.33\text{--}122.41^\circ$.

Для определения критерия смачивающей способности модификаторов линейные участки изотерм смачивания в присутствии модификаторов (рисунок 2) аппроксимировали уравнением вида:

$$\cos\theta = z C_{\text{модиф}} + \cos\theta_0, \quad (1)$$

где $\cos\theta_0$ – косинус угла, образуемого битумным вяжущим без модификатора; z – константа.

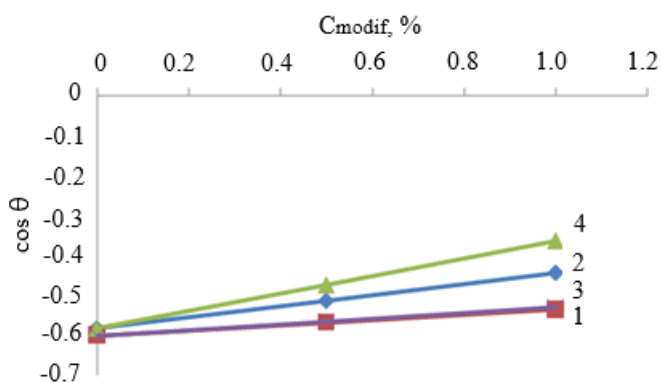


Рисунок 2 – Зависимости косинуса краевого угла смачивания поверхности основного (2,4) и кислого (1,3) щебня от концентрации модификатора: 1,2 – НПС; 3,4 – АГ-4И

Продифференцировав уравнение (1), получили:

$$d\cos\theta/dC_{\text{модиф}}=z. \quad (2)$$

Соответствующие значения z представлены в таблице.

Таблица – Значение критерия смачивающей способности z двух разновидностей модификаторов по отношению к поверхностям кислой и основной природы щебня

Модификатор/Modifier	НПС/PR	АГ-4И/AG-4I
Природа щебня/The nature of crushed stone	z	z
Серый щебень (плаггиогранит)/Gray crushed stone (plagiogranite)	0.14	0.22
Красный щебень (алаяскит)/Red crushed stone (alaskite)	0.065	0.072

Как следует из анализа полученных данных, введение АГ-4И наиболее эффективно способствует уменьшению поверхностного натяжения $\sigma_{жт}$ на границе раздела фаз «битумная композиция – серый щебень». Об этом свидетельствует максимальный показатель смачивающей способности композиции $d\cos\theta/dC_{АГ-4И}=0.22$ (таблица). Для этих же композиций эффект изменения поверхностного натяжения на межфазной границе «битум–модификатор–красный щебень» выражен менее существенно

3.2 Исследование влияния модификаторов различной природы на гидрофобность битумных пленок

Введение в битум модифицирующих добавок сопровождалось увеличением краевого угла смачивания θ в узкой области концентрации (рисунок 3). При ограниченной концентрации модификаторов полимерной природы ($C_{модиф}=0.5\%$) значение θ выросли на 5.34° (АГ-4И) и 2.42° (НПС) относительно базового варианта и составили 100.39° и 97.47° соответственно (рисунок 3, кривые 4, 5). За пределами указанного концентрационного участка отмечали незначительное ухудшение водоотталкивающих свойств битумных композиций и стабилизацию значений краевого угла смачивания $\theta=96.02^\circ-96.90^\circ$. Полученные изотермы смачивания являются детекторами изменений межмолекулярных взаимодействий внутри структуры битума при введении полимерных модификаторов (рисунок 3, кривые 4, 5). Образование смешанных пространственных структур в узком диапазоне концентраций ($C_{модиф}\leq 0,5\%$) способствует ослаблению межмолекулярных взаимодействий внутри композиций и, как следствие, увеличению θ . Дальнейшее увеличение их концентраций делает систему менее дискретной, что сопровождается незначительным уменьшением и стабилизацией краевого угла смачивания.

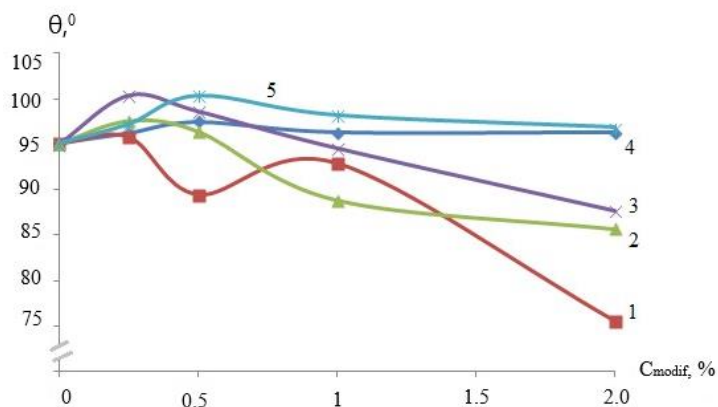


Рисунок 3– Зависимость краевого угла смачивания битумных пленок от концентрации модификаторов: 1 – NaCl; 2 – FeCl₃; 3 – CaCl₂; 4 – НПС; 5 – АГ-4И

Влияние неорганических модифицирующих добавок в зависимости от их катионного состава и количественных содержаний в битуме на водоотталкивающие свойства отражают зависимости, представленные на рис. 3 (кривые 1, 2, 3). Можно отметить ряд существенных особенностей, отличающих изотермы смачивания таких композиций от битумно-полимерных. Во-первых, максимум гидрофобности зафиксирован при меньшем содержании модификатора – 0.25%. Во-вторых, наблюдается инверсия в показателях смачивания – переход от несмачивания к смачиванию. Сопоставительный анализ изотерм смачивания композиций битума с неорганическими аддитивами показал, что в присутствии одно-, двух- и трехзарядных хлоридов гидрофобизация уменьшается в ряду: $\text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Na}^+$. Таким образом, среди исследуемых неорганических солей наибольшим водоотталкивающим эффектом обладают добавки хлорида кальция, которые ($C_{\text{CaCl}_2}=0.25\%$) обеспечивают равностепенное с АГ-4И ($C_{\text{АГ-4И}}=0.5\%$) повышение краевого угла смачивания до 100.37° .

4. Заключение

Установлено, что из двух полимерных модификаторов, АГ-4И оказывает максимальное влияние на процессы смачивания минеральных наполнителей и гидрофобность битумных пленок. При введении 1% АГ-4И в битум краевой угол смачивания уменьшился на 12.44° (относительно базового варианта без АГ-4И) и составил 113.22° . Выявлена узкая область концентраций модификатора ($C_{\text{модиф}}=0.5\%$), при которой водоотталкивающие свойства битумных композиций усиливаются ($\Delta\theta=5.34^\circ$).

Сопоставимый с АГ-4И гидрофобизирующий эффект обеспечивает введение 0.25% хлорида кальция в состав битума. За пределами данного концентрационного участка ($C_{\text{модиф}}\geq 0.25\%$) установлена точка инверсии в

показателях смачивания – переход от несмачивания к смачиванию водой ($\theta=87.71^\circ$ при $S_{\text{модиф}}=2\%$). В присутствии одно-, двух- и трехзарядных хлоридов гидрофобизация битума уменьшается в ряду: $\text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Na}^+$.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов между авторами, требующего раскрытия в данной статье.

МИНЕРАЛДЫ ТОЛТЫРҒЫШТАРДЫҢ СУЛАНУ ПРОЦЕСТЕРІНЕ МОДИФИКАТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІН ЖӘНЕ БИТУМ ПЛЕНКАЛАРЫНЫҢ ГИДРОФОБТЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Дюрягина А.Н.^{1}, Бызова Ю.С.¹, Саликова Н.С.², Островной К.А.¹, Горшкова Т.А.¹,
Савельева П.О.¹*

¹«Манап Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Петропавл, Қазақстан

²Абай Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан
e-mail: adyuryagina@inbox.ru

Түйіндеме. *Кіріспе.* Белгілі болғандай, жол асфальтбетон жабынының сапасы көбінесе мәлімделген нормаларға сәйкес келмейді. Битум мен минералды материал арасындағы адгезияның төмен деңгейі, ең алдымен, битумның қиыршық тасты, әсіресе қышқыл табиғатты тиімді ылғалдандыру қабілетінің болмауына байланысты. *Мақсаты* – битум композицияларының сулану процестеріне әртүрлі модификаторлардың әсерін анықтау. *Жұмыс әдістеріне* битумдағы полимердің сандық құрамына байланысты әр түрлі сипаттағы минералды толтырғыштарды суландыру процестерін зерттеу, сонымен қатар модификаторлардың битум пленкаларының гидрофобтығына әсер ету заңдылықтарын зерттеу кірді. Бетінің θ сулануының шеткі бұрышы эксперименттік түрде тамшы әдісімен анықталды. *Нәтижелер мен талқылау:* алынған деректерді талдаудан көрініп тұрғандай, АГ-4И енгізу "битум – сұр қиыршық тас" фазаларының шекарасындағы σ_{cr} беттік керілуін азайтуға тиімді ықпал етеді. Мұны композицияның сулану қабілетінің максималды көрсеткіші дәлелдейді. *Тұжырымдар:* екі полимерлі модификатордың ішінен пайдаланылған АГ-4И герметикалық сұйықтығы минералды толтырғыштардың сулану процестеріне және битум пленкаларының гидрофобтылығына барынша әсер ететіні анықталды. Битум композицияларының су өткізбейтін қасиеттері күшейетін модификатордың концентрациясының тар аймағы анықталды ($S_{\text{модиф}}=0.5\%$). АГ-4И-мен салыстырмалы гидрофобтандыратын әсер битум құрамына 0.25% кальций хлоридін енгізуді қамтамасыз етеді.

Түйінді сөздер: асфальтбетонды композициялар, минералды толтырғыштар, полимерлік модификаторлар, адгезия, сулану, битум пленкаларының гидрофобтығы

<i>Дюрягина Антонина Николаевна</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты, доцент</i>
<i>Бызова Юлия Сергеевна</i>	<i>химия ғылымдарының магистрі, PhD докторант, оқытушы</i>
<i>Саликова Наталья Семеновна</i>	<i>химия ғылымдарының кандидаты, доцент</i>
<i>Островной Кирилл Александрович</i>	<i>химия ғылымдарының магистрі, аға оқытушы</i>
<i>Горшкова Татьяна Александровна</i>	<i>магистрант</i>
<i>Савельева Полина Олеговна</i>	<i>студент</i>

Список литературы

1. Гуреев А.А. *Нефтяные вяжущие материалы*. Москва, Недра, **2018**, 239 с.
2. Шрубук А.О., Хаппи Вако Б.Д., Степанович Ю.А. Регулирование свойств битумных вяжущих материалов полимерными добавками. *Нефтехимия. Материалы I Междунар. науч.- техн. форума по хим. технологиям и по нефтегазопереработке*, Минск, **2018**, С. 27–29.
3. Xie J., Wu S., Pang L. Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. *Constr. Build. Mater.*, **2012**, *30*, 340–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.022>
4. Царева Е. Е. Нефтеполимерные смолы в полимерной промышленности. *Вестн. Казан. ТУ*, **2012**, *7*, 163–167.
5. Дюрягина А.Н., Бызова Ю.С., Островной К.А., Тюканько В.Ю. Утилизация отработанной герметизирующей жидкости в составе асфальтобетонных покрытий. *Извест. ТПУ. Инж. георесурсов*, **2021**, *332 (4)*, 80–86. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3150>.
6. Maliar V. Cohesion Properties of Bitumen of Different Structures. *Procedia Eng.*, **2016**, *134*, 121–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.048>.
7. Brasileiro L., Navarro F., Taste-Martinez R., De Matos J.M., Rubio-Games M.C. Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review. *Sustainability*, **2019**, *11*, 646. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030646>.
8. Apostolidis P., Liu X., Erkens S., Scarpas A. Evaluation of epoxy modification in bitumen. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, *208*, 361–368. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.013>.
9. Memon A.M., Hartadi Sutanto M., Napiah M., Khan M.I., Rafiq W. Modeling and optimization of mixing conditions for petroleum sludge modified bitumen using response surface methodology. *Constr. Build. Mater.*, **2020**, *264*, 120701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120701>
10. Eskandarsefat S., Venturini L., Ciarlitti A., Sogno E., Ottonelli I. Asphalt Concrete Modification with Plastomers: A Case Study Conducted 7 Years after Construction. *Infrastructures*, **2022**, *7*, 29. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030029>.
11. Cui S., Blackman K., Kinloch A.J., Taylor A.C. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. *Int. J. Adhes. Adhes.*, **2014**, *54*, 100–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009>
12. Chomicz-Kowalska A., Gardziejczyk W., Iwanski M. M. Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen. *Constr. Build. Mater.*, **2016**, *126*, 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004>
13. Дюрягина А.Н. *Коллоидная химия. Учебное пособие*. Петропавловск: Изд-во СКГУ, **2013**, 94 с.
14. Старостина О.И., Чистова Т.А., Степанова Е.А., Федоров И.Ф. *Активация поверхности гранитного минерального материала. Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов*. Минск: БелдорНИИ, **2002**, 155 с.

References

1. Gureev A.A. Petroleum binders. Moscow, Nedra Publ., **2018**. 239 p. (In Russ.).
2. Shrubok A.O., Khappi Vako B.D., Stepanovich Yu. A. Regulation of the properties of bituminous binders with polymer additives. Materials of the I International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing “Petrochemistry. Minsk, **2018**, pp. 27–29 (In Russ.).
3. Xie J., Wu S., Pang L. Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. *Constr. Build. Mater.*, **2012**, *30*, 340–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.022>.
4. Careva E. E. Petroleum resins in the polymer industry. *Bull. of the Kazan TU*, **2012**, *7*, 163–167. (In Russ.).
5. Dyuryagina A.N., Byzova Yu.S., Ostrovnoj K.A., Tyukan'ko V.Yu. Utilization of the waste sealing liquid component in asphalt concrete pavements. *Bull. of the TPU. Geo Assets Eng.*, **2021**, *332, no.4*, 80–86. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3150> (In Russ.).
6. Maliar V. Cohesion Properties of Bitumen of Different Structures. *Procedia Eng.*, **2016**, *134*, 121–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.048>.
7. Brasileiro L., Navarro F., Taste-Martinez R., De Matos J.M., Rubio-Games M.C. Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review. *Sustainability*, **2019**, *11*,

646. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030646>.

8. Apostolidis P., Liu X., Erkens S., Scarpas A. Evaluation of epoxy modification in bitumen. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, *208*, 361-368. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.013>.

9. Memon A.M., Hartadi Sutanto M., Napiah M., Khan M.I., Rafiq W. Modeling and optimization of mixing conditions for petroleum sludge modified bitumen using response surface methodology. *Constr. Build. Mater.*, **2020**, *264*, 120701. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120701>.

10. Eskandarsefat S., Venturini L., Ciarlitti A., Sogno E., Ottonelli I. Asphalt Concrete Modification with Plastomers: A Case Study Conducted 7 Years after Construction. *Infrastructures*, **2022**, *7*, 29. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030029>.

11. S. Cui, K. Blackman, A. J. Kinloch, A. C. Taylor. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. *Int. J. Adhes. Adhes.*, **2014**, *54*, 100-111. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009>.

12. A. Chomicz-Kowalska, W. Gardziejczyk, M.M. Iwanski. Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen. *Constr. Build. Mater.*, **2016**, *126*, 108-118. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004>.

13. Dyuryagina A.N. *Colloidal chemistry. Tutorial*. Petropavlovsk, NKSU Publ., **2013**, 94 p.

14. Starostina O.I., Chistova T.A., Stepanova E.A., Fedorov I.F. *Surface activation of granite mineral material. Construction and operation of highways and bridges*. Minsk, BeldorNII Publ., **2002**, 155 p.