

## INTERPHASE PROCESSES IN MODIFIED BITUMEN SYSTEMS

A.I. Degert, A.N. Dyuryagina, Y.S. Byzova\*, G.B. Aubakirova, A.A. Lutsenko

M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan

\*E-mail: [yuliyabyzovva@gmail.com](mailto:yuliyabyzovva@gmail.com)

**Abstract:** *Introduction.* The unsatisfactory quality of asphalt concrete road surfaces in most cases is due to poor adhesion between the bitumen binder and the surface of the mineral filler. *The aim* is to establish the influence of modifiers of various natures on the development of interphase processes in modified bitumen compositions. *The methodology of the work* included measuring the contact angle of the crushed stone surface with modified bitumen systems depending on the quantitative content of additives in bitumen and evaluating the adhesive effectiveness of modifiers. *Results and discussion.* As follows from the analysis of the data obtained, the introduction of AC-2 into bitumen favours the wetting of the crushed stone surface, which, as a result, is confirmed by a decrease in the contact angle. The values  $\theta$  of solutions of bitumen with AC-2 decreased by  $6.73^\circ$  as its concentration increased from 0 to  $3.0 \text{ g/dm}^3$ . The results of measurements of the wetting edge angle in the binary bitumen-AG-4I system indicate that the polymer additive also stimulates the process of wetting crushed stone with bitumen, but less intensively. The maximum decrease in  $\theta$  was  $3.26^\circ$  at  $C_{AG-4I} = 1.5 \text{ g/dm}^3$ . *Conclusion.* With an increased content of AC-2 ( $C_{AC-2} = 1.0 \text{ g/dm}^3$ ), cohesion and adhesion increase and reach their maximum at  $C_{AC-2} = 2.5 \text{ g/dm}^3$ :  $W_K = 89.68 \text{ mN/m}$ ,  $W_A = 13.90 \text{ mN/m}$ ,  $A = 68.55\%$ . In the presence of a sealing liquid in bitumen, the adhesive-cohesive effect has a maximum at the same concentration point ( $C_{AG-4I} = 2.5 \text{ g/dm}^3$ ) and is:  $W_K = 90.20 \text{ mN/m}$ ,  $W_A = 10.79 \text{ mN/m}$ ,  $A = 92.25\%$ .

**Keywords:** bitumen modification, polymer, surfactants, surface tension, wetting, adhesion, cohesion.

---

*Degert Alyona Ivanovna*

*PhD student; Email: [helena.dgrt@bk.ru](mailto:helena.dgrt@bk.ru),*

---

*Dyuryagina Antonina Nikolaevna*

*Candidate of Chemical Sciences, Professor, Head of department of Chemistry and Chemical Technologies; E-mail: [adyuryagina@inbox.ru](mailto:adyuryagina@inbox.ru)*

---

*Byzova Yuliya Sergeevna*

*PhD, Senior Lecturer; Email: [yuliyabyzovva@gmail.com](mailto:yuliyabyzovva@gmail.com)*

---

*Aubakirova Gulsim Bagramovna*

*Candidate of Chemical Sciences, Honored Professor; E-mail: [aubakirova.60@mail.ru](mailto:aubakirova.60@mail.ru)*

---

*Lutsenko Aida Alexandrovna*

*PhD, Associate Professor; E-mail: [1-a.13@mail.ru](mailto:1-a.13@mail.ru)*

---

**Citation:** Degert A.I., Dyuryagina A.N., Byzova Y.S., Aubakirova G.B., Lutsenko A.A. Interphase processes in modified bitumen systems. *Chem. J. Kaz.*, 2024, 4(88), 113-122. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2024-4.2710-1185.54>

## МЕЖФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИТУМНЫХ СИСТЕМАХ

Дегерт А.И., Дюрягина А.Н., Бызова Ю.С.\*, Аубакирова Г.Б., Луценко А.А.

НАО «Северо-Казахстанский Университет им. М.Козыбаева», Петропавловск, Казахстан  
\*E-mail: yuliyabyzova@gmail.com

**Резюме.** *Введение.* Неудовлетворительное качество асфальтобетонных дорожных покрытий в большинстве случаев обусловлено неудовлетворительной адгезией между битумным вяжущим и поверхностью минерального наполнителя. Эффективным способом повышения адгезионно-когезионной прочности битумо-минеральных композитов является модифицирование вяжущего различными аддитивами. *Цель* – установление влияния модификаторов различной природы на развитие межфазных процессов в модифицированных битумных композициях. *Методология работы* включала измерение краевого угла смачивания поверхности щебня модифицированными битумными системами в зависимости от количественных содержаний аддитивов в битуме и оценку адгезионной эффективности модификаторов методом отслаивания битума от поверхности щебня. *Результаты и обсуждение.* Как следует из анализа полученных данных, введение АС-2 в битум благоприятствует смачиванию поверхности щебня, что, как следствие, подтверждается уменьшением краевого угла смачивания. Значения  $\theta$  растворов битума с АС-2 уменьшались на  $6,73^\circ$  по мере увеличения его концентрации от 0 до  $3,0 \text{ г/дм}^3$ . Результаты измерений краевого угла смачивания в бинарной системе «битум-АГ-4И» свидетельствуют, что полимерный аддитив также стимулирует процесс смачивания щебня битумом, но менее интенсивно. Максимальное снижение  $\theta$  составило  $3,26^\circ$  при  $C_{\text{АГ-4И}}=1,5 \text{ г/дм}^3$ , что практически в 2 раза меньше в сравнении со смачивающим эффектом АС-2. *Заключение.* При повышенном содержании АС-2 ( $C_{\text{АС-2}} > 1,0 \text{ г/дм}^3$ ) когезия и адгезия усиливаются и достигают своего максимума при  $C_{\text{АС-2}}=2,5 \text{ г/дм}^3$ :  $W_K=89,68 \text{ мН/м}$ ,  $W_A=13,90 \text{ мН/м}$ ,  $A=68,55\%$ . В присутствии герметизирующей жидкости в битуме адгезионно-когезионный эффект имеет максимум в той же концентрационной точке ( $C_{\text{АГ-4И}}=2,5 \text{ г/дм}^3$ ) и составляет:  $W_K=90,20 \text{ мН/м}$ ,  $W_A=10,79 \text{ мН/м}$ ,  $A=92,25\%$ .

**Ключевые слова:** модифицирование битума, полимер, поверхностно-активные вещества, поверхностное натяжение, смачивание, адгезия, когезия.

<i>Дегерт Алена Ивановна</i>	<i>PhD докторант</i>
<i>Дюрягина Антонина Николаевна</i>	<i>Кандидат химических наук, профессор</i>
<i>Бызова Юлия Сергеевна</i>	<i>PhD, старший преподаватель</i>
<i>Аубакирова Гульсим Баграмовна</i>	<i>Кандидат химических наук, заслуженный профессор</i>
<i>Луценко Аида Александровна</i>	<i>PhD, доцент</i>

## 1. Введение

Как известно, основными компонентами асфальтобетона являются битум и минеральный материал [1-3]. Прочность сцепления (адгезия) между битумом и наполнителем непосредственно влияет на эксплуатационные характеристики и долговечность формируемого асфальтобетонного дорожного покрытия [4-5]. Неудовлетворительная адгезия способствует отслоению битума от поверхности щебня в присутствии влаги, что приводит к преждевременному разрушению дорожного полотна [6-8], поэтому для получения высококачественных дорожных покрытий ключевым фактором является обеспечение высокой адгезии между битумом и минеральной составляющей дорожного покрытия [8-10].

Немаловажную роль играет также когезионное взаимодействие в объемной фазе битумного битума, характеризующее сопротивление сдвигу слоев вяжущего на молекулярном уровне [11-12]. Когезия, как и адгезия, является фундаментальным показателем, дающим представление о механическом поведении битума при положительных температурах [11, 13-14]. Показатели адгезии и когезии битума позволяют прогнозировать деформационные и прочностные характеристики формируемого асфальтобетона [15-16]. Эффективным способом повышения адгезионно-когезионной прочности битумо-минеральных композитов является модифицирование вяжущего различными аддитивами [7, 13].

Целью настоящего исследования являлось установление влияния модификаторов различной природы на развитие межфазных процессов в модифицированных битумных композициях. Это потребовало исследования процессов смачивания минерального наполнителя в зависимости от количественных содержаний аддитива в битуме; а также изучения закономерностей влияния модификаторов на термодинамическую работу адгезии и адгезионную эффективность модификаторов в составе битумного вяжущего.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1 Материалы

1. Окисленный битум с пенетрацией 100/130.

2. Модифицирующие аддитивы:

- АС-2 – продукт взаимодействия кубовых остатков нефтехимии КОН-92 (ТУ 38.302-75-03-92) с карбамидом в присутствии активирующей добавки – уксусной кислоты, что позволяет обеспечить количественное аминирование высших альдегидов и исключить применение газообразного аммиака [17];

- АГ-4И – отработанная герметизирующая жидкость, продукт на основе высокомолекулярного полиизобутилена и нефтяных масел.

### 2.2 Приготовление модифицированных битумных композиций

Эффект модифицирования устанавливали при постоянной температуре (130°C), варьируя в битуме количественное содержание аддитивов ( $C_m=0\div 3.00$  г/дм<sup>3</sup>). Методика приготовления композиций заданного состава аналогична описанной ранее [18].

### 2.3 Измерение краевого угла смачивания

Измерение  $\theta$  осуществляли с использованием автоматической системы измерений динамического угла смачивания и свободной поверхностной энергии серии АСАМ. Методика измерения краевого угла смачивания подробно представлена в работе [19].

#### 2.4 Оценка адгезионных эффективности модификатора

Определение равновесной термодинамической работы адгезии  $W_a$  осуществляли на основании объединенного уравнения Дюпре-Юнга (1):

$$W_a = \sigma_{ж-г}(1 + \cos\theta), \quad (1)$$

где  $\sigma_{ж-г}$  – поверхностное натяжение битумного вяжущего на межфазной границе с воздухом;

$\theta$  – равновесный краевой угол смачивания поверхности минерального наполнителя битумом.

Термодинамическую работу когезии  $W_k$  рассчитывали по уравнению (2):

$$W_k = 2\sigma_{ж-г} \quad (2)$$

#### 2.4.2 Определение показателя адгезионной эффективности битума методом отслаивания

Минеральный наполнитель промывали дистиллированной водой и высушивали при 100 °С в сушильном шкафу, фиксировали массу и вводили щебень в разогретый битум. Смесь перемешивали до полного покрытия поверхности минерального наполнителя битумом. После полного покрытия щебень охлаждали до комнатной температуры, затем образцы выдерживали в кипящей воде в течение 30 мин. По массе отслоившегося битума от поверхности щебня после кипячения рассчитывали показатель адгезии и адгезионную эффективность модификаторов.

Расчет показателя адгезии битума  $X$  (% мас.) производили по формуле (3):

$$X = \frac{m_1 - m}{m_2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $m_1$  – масса битумо-минеральной смеси после кипячения, г;

$m$  – навеска минерального материала, г;

$m_2$  – навеска битума, г.

Адгезионную эффективность добавки  $A$  (%) рассчитывали по формуле (4):

$$A = \frac{X_i - X_o}{X_o} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $X_i$  – показатель адгезии битума, модифицированного добавкой (% мас.);

$X_o$  – показатель адгезии исходного битума (% мас.).

### 3. Результаты и обсуждение

Влияние концентрации модификатора АС-2 на изменения, происходящие на межфазных границах битума с минеральным наполнителем и воздухом, представлено в таблице 1.

**Таблица 1** - Показатели физико-химических характеристик бинарной системы «битум-АС-2».

$C_{AC-2}$ , г/дм <sup>3</sup>	$\theta$ , °	$\cos\theta$	$\sigma$ , мН/м	$W_k$ , мН/м	$W_a$ , мН/м
0	140.10	-0.77	40.50	81.00	9.43
0.5	137.59	-0.74	38.36	76.72	10.04
1.0	135.66	-0.72	36.24	72.48	10.32
1.5	134.32	-0.70	37.54	75.08	11.31
2.0	133.55	-0.69	40.18	80.36	12.50
2.5	133.37	-0.69	44.84	89.68	13.90
3.0	133.77	-0.69	44.10	88.20	13.67

Для обоснования процессов межфазных изменений в бинарной системе «битум-АС-2», отчасти представленных ранее [23], на основе сопоставления поверхностных натяжений растворов модифицированного битума ( $\sigma_{ж-г}$ ) и краевого угла смачивания ими поверхности щебня ( $\theta$ ) можно констатировать следующее:

1. Введение АС-2 в битум благоприятствует смачиванию поверхности щебня, что, как следствие, подтверждается уменьшением краевого угла смачивания. Значения  $\theta$  растворов битума с АС-2 уменьшались на  $6,73^\circ$  по мере увеличения его концентрации от 0 до 3.0 г/дм<sup>3</sup>.

2. Убыль значений  $\theta$  согласуется с уменьшением поверхностного натяжения в области концентраций АС-2  $C \leq 1.0$  г/дм<sup>3</sup>; вместе с тем, при содержании АС-2 свыше 1.0 г/дм<sup>3</sup> отмечали разновекторность в изменении этих двух характеристик: стабилизацию краевого угла смачивания при одновременном повышении значений  $\sigma_{ж-г}$ .

Рассчитанные значения работы когезии ( $W_k$ ) и адгезии ( $W_a$ ), определяемые, с одной стороны изменением характеристик растворов, а с другой – их смачивающим эффектом в отношении твердофазных дисперсий щебня в зависимости от количественных содержаний АС-2 в исследуемой системе, представлены в таблице 1. Согласно полученным данным, повышение содержания АС-2 в битуме вплоть до 1.0 г/дм<sup>3</sup> сопровождалось уменьшением сил межмолекулярного взаимодействия в объеме; убыль работы когезии в бинарной композиции «битум-АС-2» при увеличении концентрации аддитива от 0 до 1.0 г/дм<sup>3</sup> составила 8.52 мН/м. В этом же

ряду изменение концентрации АС-2, судя по значениям равновесной работы адгезии, наблюдается незначительное повышение прочности закрепления битума на поверхности минерального наполнителя; значения работы адгезии при увеличении концентрации АС-2 от 0 до 1.0 г/дм<sup>3</sup> увеличились от 9.43 до 10.32 мН/м. Более глубокое воздействие АС-2 на процессы когезии и адгезии происходит в диапазоне его повышенных концентраций ( $C > 1.0$  г/дм<sup>3</sup>). На участке от 1.0 до 3.0 г/дм<sup>3</sup> происходит усиление когезионных взаимодействий в объеме битумного вяжущего (от 72.48 до 88.20 мН/м), сопровождаемое одновременным повышением работы  $W_A$ , необходимой для разрыва единицы площади межфазного поверхностного слоя (от 10.32 до 13.67 мН/м).

Влияние концентрации модификатора АГ-4И на изменения, происходящие на межфазных границах битума с щебнем и воздухом представлено в таблице 2.

Таблица 2 - Показатели физико-химических характеристик бинарной системы «битум-АГ-4И».

$C_{АГ-4И}$ , г/дм <sup>3</sup>	$\theta$ , °	$\cos\theta$	$\sigma$ , мН/м	$W_k$ , мН/м	$W_A$ , мН/м
0	140.10	-0.77	40.50	81.00	9.43
0.5	138.57	-0.75	38.42	76.84	9.61
1.0	137.35	-0.74	36.32	72.64	9.61
1.5	136.84	-0.74	34.24	68.48	9.63
2.0	137.03	-0.73	38.06	76.12	10.21
2.5	139.53	-0.76	45.10	90.20	10.79
3.0	137.93	-0.74	41.54	83.08	10.70

Результаты измерений краевого угла смачивания в бинарной системе «битум-АГ-4И» (таблица 2) свидетельствуют, что полимерный аддитив также стимулирует процесс смачивания щебня битумом, но менее интенсивно. Максимальное снижение  $\theta$  составило 3.26° при  $C_{АГ-4И}=1.5$  г/дм<sup>3</sup>, что практически в 2 раза меньше в сравнении со смачивающим эффектом АС-2. На том же концентрационном участке наблюдалась более значительная убыль работы когезии: при увеличении содержания АГ-4И от 0 до 1.5 г/дм<sup>3</sup> значение  $W_k$  уменьшилось на 12.52 мН/м, при одновременном незначительном повышении прочности закрепления модифицированного битума на поверхности щебня ( $\Delta W_A=0.20$  мН/м). Однако, дальнейшее повышение содержания модификатора (от 1.5 до 2.5 г/дм<sup>3</sup>) в бинарной системе «битум-АГ-4И» стимулировало усиление когезионных взаимодействий в объеме битумного вяжущего (от 81.00 до 90.20 мН/м), а

также увеличение равновесной термодинамической работы адгезии (от 9.63 до 10.79 мН/м), что соизмеримо с уровнем изменения адгезионно-когезионных взаимодействий в битуме под влиянием АС-2 (табл.1).

Адгезионно-когезионная эффективность модификаторов, помимо определения термодинамической равновесной адгезии ( $W_A$ ), была подтверждена методом определения массы отслоившегося битумного вяжущего с поверхности щебня, после его кипячения в воде (таблица 3).

**Таблица 3** - Адгезионная эффективность модификаторов в составе бинарных композиций по отношению к поверхности щебня.

$C_{AC-2}$ , г/дм <sup>3</sup>	X, %масс.	A, %	$C_{AG-4И}$ , г/дм <sup>3</sup>	X, %масс.	A, %
0	34.38	0	0	34.38	0
0.5	35.18	2.32	0.5	43.88	27.62
1.0	41.08	19.49	1.0	53.27	54.96
1.5	46.72	35.89	1.5	60.66	76.43
2.0	49.24	43.21	2.0	62.02	80.41
2.5	57.95	68.55	2.5	66.10	92.25
3.0	46.70	35.83	3.0	58.79	71.00

Результаты исследований, представленные в таблице 3, свидетельствуют, что в сравнении с немодифицированным битумом, в бинарной системе «битум-АС-2» максимальная адгезионная эффективность (68.55%) зафиксирована в той же концентрационной точке ( $C_{AC-2}=2.5$  г/дм<sup>3</sup>), что и максимум термодинамической работы адгезии (13.90 мН/м, таблица 1). При таком же содержании АГ-4И в битуме ( $C_{AG-4И}=2.5$  г/дм<sup>3</sup>) адгезионная эффективность по отношению к поверхности щебня оказалась выше и составила 92.25 %.

#### 4. Заключение

1. Адгезионно-когезионные процессы в модифицированных битумных системах лимитируются эффектом смачивания минеральных наполнителей и интенсивностью межмолекулярных сил в конденсированной фазе.

2. При ограниченных содержаниях АС-2 ( $C_{AC-2} \leq 1.0$  г/дм<sup>3</sup>) в битуме выявлена разновекторность в характере изменения когезионно-адгезионных взаимодействий: уменьшение работы когезии (от 81.00 до 72.48 мН/м) и увеличение работы адгезии (от 9.43 до 10.32 мН/м).

3. При повышенном содержании АС-2 ( $C_{AC-2} > 1.0$  г/дм<sup>3</sup>) когезия и адгезия усиливаются и достигают своего максимума при  $C_{AC-2}=2.5$  г/дм<sup>3</sup>:  $W_K=89.68$  мН/м,  $W_A=13.90$  мН/м,  $A=68.55\%$ .

4. В присутствии герметизирующей жидкости в битуме адгезионно-когезионный эффект имеет максимум в той же концентрационной точке ( $C_{AG-4И}=2.5$  г/дм<sup>3</sup>) и составляет:  $W_K=90.20$  мН/м,  $W_A=10.79$  мН/м,  $A=92.25\%$ .

**Финансирование:** Научно-исследовательская работа осуществлена в рамках ГФ АР19677707 Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## МОДИФИКАЦИЯ ЛАНҒАН БИТУМ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ФАЗААРАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР

*А.И. Дегерт, Ю.С. Бызова\*, А.Н. Дюрягина, Г.Б. Аубакирова, А.А. Луценко*

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

\*E-mail: [yuliyabyzovva@gmail.com](mailto:yuliyabyzovva@gmail.com)

**Түйіндеме.** *Кіріспе.* Асфальтбетонды жол жабындарының қанағаттанарлықсыз сапасы көп жағдайда битумды байланыстырғыш пен минералды толтырғыштың беті арасындағы қанағаттанарлықсыз адгезияға байланысты. Битумды минералды композиттердің адгезиялық-когезиялық беріктігін арттырудың тиімді әдісі тұтқыр затты әртүрлі аддитивтермен өзгерту болып табылады. *Мақсаты*-әртүрлі сипаттағы модификаторлардың модификацияланған битумдық композициялардағы фазааралық процестердің дамуына әсерін анықтау. *Жұмыс әдіснамасы* битумдағы аддитивтердің сандық мазмұнына байланысты өзгертілген битум жүйелерімен қиыршық тас бетін сулаудың шеткі бұрышын өлшеуді және битумды қиыршық тас бетінен бөліну әдісімен модификаторлардың адгезия тиімділігін бағалауды қамтыды. *Нәтижелер және талқылау.* Алынған деректерді талдаудан көрініп тұрғандай, АС-2-ні битумға енгізу қиыршық тас бетінің сулануына жағдай туғызады, нәтижесінде ылғалданудың шеткі бұрышының төмендеуімен расталады. АС-2 бар битум ерітінділерінің  $\theta$  мәндері оның концентрациясы 0-ден 3.0 г/дм<sup>3</sup>-ке дейін жоғарылаған сайын 6,73°-қа азайды. "Битум-АГ-4И" бинарлы жүйесіндегі ылғалдандырудың шеткі бұрышын өлшеу нәтижелері полимерлі аддитив сонымен қатар қиыршық тасты битуммен сулау процесін ынталандыратынын, бірақ аз қарқынды екенін көрсетеді.  $\theta$  максималды төмендеуі  $C_{AG-4I}=1.5$  г/дм<sup>3</sup> кезінде 3.26° болды, бұл АС-2 сулану әсерімен салыстырғанда шамамен 2 есе аз. *Қорытынды.* АС-2 ( $C_{AC-2}>1.0$  г/дм<sup>3</sup>) жоғарылаған кезде когезия мен адгезия күшейіп,  $C_{AC-2}=2.5$  г/дм<sup>3</sup>:  $W_K=89.68$  мН/м,  $W_A=13.90$  мН/м,  $A=68.55\%$  кезінде максимумға жетеді. Битумда туғыздағыш сұйықтықтың қатысуымен адгезиялық-когезиялық әсері сол концентрация нүктесінде максимумға ие ( $C_{AG-4I}=2.5$  г/дм<sup>3</sup>) және:  $W_K=90.20$  мН/м,  $W_A=10.79$  мН/м,  $A=92.25\%$  құрайды.

**Түйінді сөздер:** битумды модификациялау, полимер, беттік белсенді заттар, беттік керілу, сулану, адгезия, когезия

<i>Дегерт Алена Ивановна</i>	<i>PhD докторант</i>
<i>Дюрягина Антонина Николаевна</i>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты, профессор</i>
<i>Бызова Юлия Сергеевна</i>	<i>PhD, аға оқытушы</i>
<i>Аубакирова Гульсим Баграмовна</i>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты, еңбек сіңірген профессор</i>
<i>Луценко Аида Александровна</i>	<i>PhD докторы, доцент</i>

## Список литературы:

1. White G. State of the art: asphalt for airport pavement surfacing. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, **2018**, Vol. 11, 77-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.008>
2. Тюкилина П.М., Гуреев А.А., Тыщенко В.А. Производство нефтяных дорожных вяжущих. Москва, Недра, **2021**, 501 с.
3. Гуреев А. А. Нефтяные вяжущие материалы. Москва, Недра. **2018**, 239 с.
4. Lu Z., Chen A., Wu S., Li Y., Zou Y., Zhu Y., Wang K. Experimental Study on the Physicochemical Properties of Asphalt Modified by Different Anti-Stripping Agents and Their Moisture Susceptibility with Aggregates. *Materials.*, **2023**, Vol. 16, 4545. <https://doi.org/10.3390/ma16134545>



5. Guo M., Tan Y., Wang L., Hou Y. A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate. *Front. Struct. Civ. Eng.*, **2018**, Vol. 12, 248-259. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0422-x>
6. 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**, Vol. 126, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004>
7. Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C.O. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Appl. Sci.*, **2019**, Vol. 9, 742-1-742-35. <https://doi.org/10.3390/app9040742>
8. Golchin B., Meor O., Mohd R. Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. *Constr. Build. Mater.*, **2017**, Vol. 141, 578-588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.123>
9. Pasandin A. R., Perez I. The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen. *Int. J. Adhes. Adhes.*, **2015**, Vol. 58, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.01.005>
10. Jiang J., Ni F., Gu X., Yao L., Dong Q. Evaluation of aggregate packing based on thickness distribution of asphalt binder, mastic and mortar within asphalt mixtures using multiscale methods. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, Vol. 222, 17-730. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.083>
11. Veytskin Y., Bobko C., Castorena C., Kim Y. R. Nanoindentation investigation of asphalt binder and mastic cohesion. *Constr. Build. Mater.*, **2015**, Vol. 100, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.053> Get rights and content
12. Ma X., Chen H., Cao G. et al. Investigation of viscoelastoplastic behavior of asphalt mastic: Effects of shear strain rate and filler volume fraction. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, Vol. 200, 559-569.
13. Kemalov A., Kemalov R., Abdrafikova I., Fakhretdinov P., Valiev D. Polyfunctional Modifiers for Bitumen and Bituminous Materials with High Performance. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2018**, Vol. 10, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/7913527>
14. Guo M., Bhasin A., Tan Y. Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder. *Constr. Build. Mater.*, **2017**, Vol. 141, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.051>
15. Cui S., Blackman B., Kinloch A.J., Taylor C.A. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. *Int. J. Adhes. Adhes.*, **2014**, Vol. 54, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009>
16. Dyuryagina A., Byzova Y., Ostrovnoy K., Demyanenko A., Tyukanko V., Lutsenko A. The Effect of the Microstructure and Viscosity of Modified Bitumen on the Strength of Asphalt Concrete. *Polymers.*, **2024**, Vol. 16, 1370. <https://doi.org/10.3390/polym16101370>
17. Патент РК №10797 Способ получения ингибитора кислотной коррозии металлов. Болатбаев К.Н., Дюрягина А.Н., Нурушов А.К., Корьгина О.Г. **2004**. <https://kzpatents.com/0-pp14466-sposob-polucheniya-ingibitora-kislotnojj-korrozii-metallov.html>
18. Dyuryagina A.N., Degert A.I., Byzova Y.S., Lutsenko A.A., Shirina T.V., Ostrovnoy K.A. Investigation of surface properties of modified bitumen compositions. *Chem. J. Kaz.*, **2024**, 2 (86), 105-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.51580/2024-2.2710-1185.26>
19. Dyuryagina A., Byzova Y., Ostrovnoy K., Demyanenko A., Lutsenko A., Shirina T. Increasing the Adhesion of Bitumen to the Surface of Mineral Fillers through Modification with a Recycled Polymer and Surfactant Obtained from Oil Refining Waste. *Polymers.*, **2024**, 16, 714. <https://doi.org/10.3390/polym16050714>

## References

1. White G. State of the art: asphalt for airport pavement surfacing. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, **2018**, Vol. 11, 77-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.008>
2. Tyukina P.M., Gureev A.A., Tyshchenko V.A. Production of petroleum road binders. Moscow, Nedra. **2021**, 501 p. (In Russ.).
3. Gureev A. A. Petroleum binders. Moscow, Nedra. **2018**, 239 p. (In Russ.).
4. Lu Z., Chen A., Wu S., Li Y., Zou Y., Zhu Y., Wang K. Experimental Study on the Physicochemical Properties of Asphalt Modified by Different Anti-Stripping Agents and Their Moisture Susceptibility with Aggregates. *Materials.*, **2023**, Vol. 16, 4545. <https://doi.org/10.3390/ma16134545>

5. Guo M., Tan Y., Wang L., Hou Y. A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate. *Front. Struct. Civ. Eng.*, **2018**, Vol. 12, 248-259. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0422-x>
6. 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**, Vol. 126, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004>
7. Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C.O. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Appl. Sci.*, **2019**, Vol. 9, 742-1-742-35. <https://doi.org/10.3390/app9040742>
8. Golchin B., Meor O., Mohd R. Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. *Constr. Build. Mater.*, **2017**, Vol. 141, 578-588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.123>
9. Pasandin A. R., Perez I. The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen. *Int. J. Adhes. Adhes.*, **2015**, Vol. 58, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.01.005>
10. Jiang J., Ni F., Gu X., Yao L., Dong Q. Evaluation of aggregate packing based on thickness distribution of asphalt binder, mastic and mortar within asphalt mixtures using multiscale methods. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, Vol. 222, 17-730. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.083>
11. Veytskin Y., Bobko C., Castorena C., Kim Y. R. Nanoindentation investigation of asphalt binder and mastic cohesion. *Constr. Build. Mater.*, **2015**, Vol. 100, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.053> Get rights and content
12. Ma X., Chen H., Cao G. et al. Investigation of viscoelastoplastic behavior of asphalt mastic: Effects of shear strain rate and filler volume fraction. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, Vol. 200, 559-569.
13. Kemalov A., Kemalov R., Abdrafikova I., Fakhretdinov P., Valiev D. Polyfunctional Modifiers for Bitumen and Bituminous Materials with High Performance. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2018**, Vol. 10, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/7913527>
14. Guo M., Bhasin A., Tan Y. Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder. *Constr. Build. Mater.*, **2017**, Vol. 141, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.051>
15. Cui S., Blackman B., Kinloch A.J., Taylor C.A. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. *Int. J. Adhes. Adhes.*, **2014**, Vol. 54, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009>
16. Dyuryagina A., Byzova Y., Ostrovnoy K., Demyanenko A., Tyukanko V., Lutsenko A. The Effect of the Microstructure and Viscosity of Modified Bitumen on the Strength of Asphalt Concrete. *Polymers.*, **2024**, Vol. 16, 1370. <https://doi.org/10.3390/polym16101370>
17. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 10797 Method for obtaining an inhibitor of acid corrosion of metals. Bolatbaev K.N., Dyuryagina A.N., Nurushov A.K., Korytina O.G. **2004**. <https://kzpatents.com/0-pp14466-sposob-polucheniya-ingibitora-kislотноj-korrozii-metallov.html>
18. Dyuryagina A.N., Degert A.I., Byzova Y.S., Lutsenko A.A., Shirina T.V., Ostrovnoy K.A. Investigation of surface properties of modified bitumen compositions. *Chem. J. Kaz.*, **2024**, 2 (86), 105-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.51580/2024-2.2710-1185.26>
19. Dyuryagina A., Byzova Y., Ostrovnoy K., Demyanenko A., Lutsenko A., Shirina T. Increasing the Adhesion of Bitumen to the Surface of Mineral Fillers through Modification with a Recycled Polymer and Surfactant Obtained from Oil Refining Waste. *Polymers.*, **2024**, 16, 714. <https://doi.org/10.3390/polym16050714>