

УДК 678.073:678.046:620.163.1

<https://doi.org/10.15407/polymerj.41.04.253>

## Подовження ресурсу дорожнього покриття шляхом модифікації бітуму термопластичним динамічним вулканізатом на основі відходів полімерів

О.П. Григор'єва<sup>1</sup>, Р. Ahmedzade<sup>2</sup>, S.H. Kasanagh<sup>2</sup>, О.М. Старостенко<sup>1</sup>, О.М. Файнлейб<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України

48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна

<sup>2</sup>Егейський університет, Борнова, Ізмір, Туреччина

*Досліджено ефект комплексного модифікатора зі структурою термопластичного динамічного вулканізату (ТДВ), отриманого динамічною вулканізацією реактивованої подрібненої шинної гуми (РПШГ) у термопластичній матриці з вторинного поліетилену низького тиску (ПЕНТ) та етилен-пропілен-дієнового мономеру (ЕПДМ), на фізико-механічні характеристики полімербітумних в'язучих на основі дорожнього бітуму. Із застосуванням традиційних методів та європейських стандартів, а також використовуючи сучасну систему міжнародних стандартів "Supergrove", встановлено, що введення у дорожній бітум розробленого комплексного модифікатора зумовлює підсилення комплексу фізико-механічних показників отриманих полімербітумних в'язучих залежно від вмісту ТДВ. Так, на відміну від індивідуального бітуму, у зразках полімербітумних в'язучих зі збільшенням вмісту ТДВ від 3 до 7 % мас. зафіксовано: підвищення на 3–13 °С величини температури розм'якшення ( $T_p$ ), зменшення в 1,3–1,7 рази величини penetрації ( $P_{25}$ , за  $T = 25$  °С) і, відповідно, підвищення в 1,1–3,3 рази індексу penetрації (ІП). Також для створених полімербітумних в'язучих зафіксовано значне підвищення комплексного модуля зсуву ( $G^*$ ), параметра колійності ( $G^*/\sin \delta$ ) і високотемпературної складової класу ефективності PG (PG-Performance Grades) зі збільшенням вмісту ТДВ. Так, наприклад, порівняно з немодифікованим бітумом, зразок полімербітумного в'язучого, що містить 7 % мас. ТДВ, за температур випробувань 58–70 °С, відповідно, має більший у  $k \approx 9,0$ –14,4 рази модуль  $G^*$  та більший у 10,8–18,7 рази параметр колійності  $G^*/\sin \delta$ ; також зафіксовано істотне підвищення класу ефективності до PG 82-Y (на відміну від PG 64-Y для індивідуального бітуму), яке означає, що цей зразок в'язучого буде ефективно працювати за температури дорожнього покриття до 82 °С (включно). Зроблено висновок щодо перспективності застосування полімербітумних в'язучих, розроблених з використанням комплексного модифікатора зі структурою ТДВ, у дорожньому покритті для подовження його ресурсу, підвищення зсувостійкості, супротиву утворенню колійності, а також стійкості до дії високих температур зовнішнього середовища.*

**Ключові слова:** термопластичні динамічні вулканізати, вторинні поліетилен і шинна гума, дорожній бітум, полімербітумне зв'язуюче, фізико-механічні властивості.

### Вступ.

Нинішній стан українських автомобільних доріг, поза всяким сумнівом, є загальнонаціональною проблемою. Останнім часом на ремонт доріг з державного бюджету країни виділяється все більше коштів (у 2019 році Укравтодор має отримати рекордні 56 мільярдів гривень [1]), проте дотепер українські автомобільні дороги чи не найгірші у світі. Так, за даними індексу глобальної конкурентоспроможності (Global Competitiveness Index) у 2017–2018 роках Україна у світовому рейтингу якості доріг посіла лише 130 місце зі 137-ми [2], після України на 131-му місці Парагвай

(Південна Америка), а 137 місце з найгіршими дорогами у світі посіла Мавританія (Африка).

Відомо, що найбільших пошкоджень дорожньому полотну завдає пересування великовагового транспорту зі значним перевищенням вагових норм і швидкості руху і, як результат, дорожні покриття передчасно руйнуються внаслідок утворення тріщин і вибоїн, просідання полотна, виникнення колійності тощо [3–5]. Експерти-промисловці вважають, що якщо у XXI сторіччі в країні відсутні якісні та швидкісні автомобільні дороги, то така країна не може мати конкурентоздатну та

ефективну економіку. Тому пріоритетним завданням нашої держави, вочевидь, є кардинальне покращення якості дорожнього покриття автомобільних доріг шляхом впровадження сучасних технологій при їх будівництві. Відомо, що для підвищення експлуатаційної надійності дорожніх покриттів достатньо змінити якість дорожнього бітуму.

Одним із ефективних способів подовження ресурсу дорожнього покриття, особливо за підвищених температур експлуатації, є використання при будівництві полімербітумних в'язучих, які здатні істотно збільшити інтервал працездатності асфальтобетонів за рахунок підвищення їхніх деформаційної жорсткості та утомної витривалості [6–9]. На сьогодні в Україні для модифікації дорожнього бітуму застосовують, переважно, дорогі імпортні полімерні модифікатори, такі як “Starphos”, “Kraton”, “Viscobot”, «Plasten» тощо, що істотно підвищує вартість асфальтобетонних сумішей. У роботах [6–9] як модифікатори, що покращують якість бітумних в'язучих, були використані такі полімери: статистичні та блок-кополімери стиролу і бутадієну, поліетилен, гідрогенізовані бутадієнстирольні блок-кополімери, кополімери етилену і вінілацетату (ЕВА), поліпропілен, неопрен та інші. Проте найбільш ефективно використання в рецептурах дорожнього бітуму комплексних модифікаторів, виготовлених на основі вторинних полімерів, наприклад, поліолефінів і гум, оскільки це дає змогу також вирішувати проблему утилізації відходів цих багатотоннажних промислових полімерів і продукції на їх основі. Так, у роботах [10–13] запропоновано ефективні методи модифікації бітумів або гарячої асфальтової суміші відходами поліетиленів, поліпропіленів, а також подрібненої шинної гуми (ПШГ) із відпрацьованих автомобільних покришок. У роботі [14] нами розроблено рецептури та отримано і досліджено зразки асфальтобетонів на основі бітумів, модифікованих відходами кордного волокна з відпрацьованих автомобільних шин, і показано, що таке мікроармування асфальтобетонів зумовлює значне покращення всього комплексу їхніх фізико-механічних характеристик та подовження ресурсу дорожнього покриття. У роботах [15–17] нами також запропоновано ефективні методи щодо підвищення стійкості бітумів

Таблиця 1. Основні фізичні характеристики вихідних ПЕНТ<sub>в</sub> і ЕПДМ

Характеристика	ЕПДМ	ПЕНТ <sub>в</sub>
Температура склування, °С	-36	-15
Температура плавлення, °С	47	136
Температурний інтервал плавлення кристалітів, °С:		
початок, $T_{пл(поч)}$	28	37
кінець, $T_{пл(кін)}$	65	160
інтервал, $\Delta T_{пл}$	37	123
Ступінь кристалічності, %	12	65

до високих температур і супротиву утворенню колійності асфальтобетонів, отриманих на їх основі, шляхом модифікації бітумів відходами термопластів (поліетилен високого тиску, поліетилен низького тиску або поліпропілен), які попередньо були опромінені аеро-іонами, гамма-променями або електронами. У роботі [18], де як полімерно-дисперсно-армуючу (ПДА) добавку використовували гумовий термоеластопласт (ГТЕП), показано, що ГТЕП забезпечує підвищення стійкості асфальтобетонів до утворення колійності у ~2,4–2,7 раза та стійкості до накопичення залишкових деформацій у ~2,3 раза.

Метою цієї роботи було визначити ефективність використання ресурсозберігаючого комплексного модифікатора типу термопластичного динамічного вулканізату (ТДВ), отриманого на основі вторинної полімерної сировини, для створення ефективних полімербітумних в'язучих із цінним комплексом фізико-механічних характеристик для підвищення довговічності асфальтобетонного покриття із застосуванням традиційних методів і європейських стандартів, а також сучасної системи міжнародних стандартів “Superpave”.

**Об'єкти і методи дослідження.**

**Матеріали.** Вторинний поліетилен низького тиску (ПЕНТ<sub>в</sub>) (із відходів тарних ящиків) мав такі характеристики: індекс текучості розтопу (ІТР) ~ 2,13 г/10 хв (за  $T=190$  °С, 2,16 кгс), густина ( $\rho$ ) ~ 0,956 г/см<sup>3</sup>, межа міцності при розриві ( $\sigma_p$ ) ~ 33,0 МПа, відносне подовження при розриві ( $\epsilon_p$ ) ~ 18 %. Етилен-пропілен-дієновий мономер (ЕПДМ) (марка Buna® EP G 6470, Bayer AG, Німеччина) містив етилену ~71 % мас., пропілену

Таблиця 2. Основні характеристики вихідної ПШГ

Характеристика	Стандарт	Показник
Питома вага, г/см <sup>3</sup>	ISO 2781	1,1–1,20
Зольність, %	ASTM E1131-86	5
Екстракт із ацетону, %	ISO 1407:2011	11–17
Вміст сажі, %	ASTM E 1131-86	32–36
Міцність при розриві, МПа	ISO R 37	> 5,0
Подовження при розриві, %	ISO R 37	>90
Твердість, Шор А	ISO R 868	72
Густина, г/см <sup>3</sup>	ISO R 868	1,18
Пружність, %	DIN 53.512	40
Стирання, мм <sup>3</sup>	DIN 53.516	220

Таблиця 3. Основні характеристики дорожнього бітуму марки В 50/70 (компанія “Turpas Refinery”, Туреччина)

Характеристика	Тест метод	Показник за стандартом
Пенетрація, 0,1 мм	TS EN 1426	50–70
Температура розм'якшення, °С	TS EN 1427	46–54
Температура крихкості за Фраасом, °С	TS EN 12593	макс. –8
Точка спалаху, °С	TS EN 2592	мін. 230
Густина, г/см <sup>3</sup>	TS EN 2592	1,021
Стійкість до старіння (RTFOT):		
- зміна маси, %	TS EN 12607-1	макс. 0,5
- збереження пенетрації, %	TS EN 1426	мін. 50
- збільшення температури розм'якшення, °С	TS EN 1427	макс. 9,0
Розчинність (CCl <sub>3</sub> , T = 25 °С), %	TS EN 12592	мін. 99,0

~24,5 % мас. і 5-етиліденнорборнену-2 ~4,5 % мас. і мав такі характеристики:  $\rho \sim 0,883 \text{ г/см}^3$ ;  $\sigma_p \sim 11,2 \text{ МПа}$ ;  $\epsilon_p \sim 840 \%$ . Основні фізичні характеристики вихідних ПЕНТ<sub>в</sub> та ЕПДМ, отримані методом диференційної сканувальної калориметрії (ДСК), наведено у табл. 1.

Високодисперсна подрібнена шинна гума (ПШГ) (Scanrub AS, Данія) з розміром гумових частинок ~0,4–0,7 мм,  $\rho \sim 1,18 \text{ г/см}^3$  мала такий склад: полі-цис-ізопрен ~30 %, полі(бутадиєн-ко-стирол) ~40 %, полібутадиєн-1,4 ~20 %, поліізобутилен ~10 %, технічна сажа ~32 мас. ч. на 100 мас. ч. еластомеру. Основні характеристики вихідної ПШГ наведено в табл. 2.

Бітум марки БН-5 (ГОСТ 6617-76), який використовували для реактивації ПШГ (далі для реактивованої ПШГ введено скорочення – РПШГ) за методикою, запропонованою нами у роботі [19], мав такі характеристики:  $\rho \sim 1,009 \text{ г/см}^3$ , температура розм'якшення ( $T_p$ )  $\approx 89 \text{ °С}$ , вміст асфальтенів  $\approx 31,4\text{--}32,1 \%$  мас.,  $M_w \approx 13900$ ,  $M_n \approx 6500$ ,  $M_z \approx 29400$ , індекс полідисперсності  $M_w/M_n \approx 2,15$ . Було обрано співвідношення компонентів ПШГ/бітум БН-5  $\approx 1/1$ , при цьому бітум був мультифункціональним агентом, забезпечуючи на першому етапі часткову деструкцію (на ~13–15 %) і реактивацію ПШГ, а на етапі синтезу термопластичного динамічного вулканізату (ТДВ) брав участь у формуванні гібридної ЕПДМ/РПШГ еластомерної сітки та компатибілізації термопластичної і каучукової складових утворених ТДВ [19].

У цій роботі використано дорожній бітум марки В 50/70 (компанія “Turpas Refinery”, Туреччина) для створення на його основі полімербітумних в'язучих для асфальтобетону за методикою, описаною нижче. Основні характеристики бітуму марки В 50/70 наведено у табл. 3.

**Приготування зразка комплексного модифікатора для дорожнього бітуму.** Комплексний модифікатор – ТДВ було отримано динамічною вулканізацією РПШГ у термопластичній ПЕНТ<sub>в</sub>/ЕПДМ матриці шляхом змішування компонентів в одношнековому екструдері (модель екструдера – PLV 150) за  $T \approx 155\text{--}175 \text{ °С}$  і швидкості обертання шнека 60 об/хв впродовж  $\tau \sim 45 \text{ хв}$ , за співвідношення компонентів у ТДВ: ПЕНТ<sub>в</sub>/ЕПДМ/РПШГ  $\approx 40/35/25 \%$  мас. Основні характеристики

отриманого модифікатора ТДВ наведено в табл. 4.

**Приготування зразків полімербітумних в'язучих** проводили на основі дорожнього бітуму В 50/70 із вмістом ТДВ 3, 4, 5, 6 і 7 % мас. таким чином: спочатку компоненти впродовж  $\tau \sim 120 \text{ хв}$  нагрівали у термошафі за  $T \approx 160 \text{ °С}$ , потім компоненти змішували за цієї ж температури у змішувачі з використанням високошвидкісної мішалки за швидкості обертання  $v \approx 700 \text{ об/хв}$  впродовж  $\tau \sim 15 \text{ хв}$  і за  $v \approx 1800 \text{ об/хв}$  впродовж  $\tau \sim 45 \text{ хв}$ . Отриманим зразкам дали таке кодування: немодифікований бітум – НБ; полімербітумне в'язуче із вмістом 3, 4, 5, 6 і 7 % мас. ТДВ – БЗТДВ, Б4ТДВ, Б5ТДВ, Б6ТДВ і Б7ТДВ відповідно.

#### Методи досліджень.

Для визначення фізико-механічних характеристик дорожнього бітуму та розроблених на його основі полімербітумних в'язучих, залежно від вмісту в них ТДВ, були використані як традиційні методи оцінки якості бітумів згідно з європейськими стандартами EN 12591:2009 [20], EN 1426:2007 [21], EN 1427:2007 [22], EN 14023:2005 [23], так і сучасна система міжнародних стандартів “Superpave” (Superior Performing Asphalt Pavement – Високоякісні Бітумні Покриття), розроблена в США у рамках виконання стратегічної дорожньої дослідницької програми “SHRP – Strategic Highway Research Program”, яка базується на фундаментальних фізико-хімічних принципах і законах, а також враховує реальні умови роботи бітумів у дорожніх конструкціях

Таблиця 4. Основні характеристики комплексного модифікатора ТДВ

Характеристика	Показник
Межа міцності при розриві, МПа	10
Відносне подовження при розриві, %	435
Жорсткість (Шор А)	87
Енергія активації в'язкої течії, кДж/моль	30
Температура плавлення, °С	129
Інтервал плавлення, °С	59
Ступінь кристалічності*, %	62
Температура склування, °С	–14

\* Значення ступеня кристалічності визначено методом ДСК із врахуванням масової частки ПЕНТ<sub>в</sub>-складової у ТДВ.

[6, 24–26].

За традиційними методами оцінки якості бітумів було визначено величину пенетрації ( $P_{25}$ ) за  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$  [21], температуру розм'якшення ( $T_p$ ) [22], індекс пенетрації ( $IP$ ) (за формулами 1 і 2), а також температуру крихкості ( $T_{кр}$ ) та інтервал пластичності ( $T_p - T_{кр}$ ) за такими формулами [6, 27]:

$$IP = 30 / (1 + 50A) - 10, \quad (1)$$

$$A = (2,9031 - \log P_{25}) / (T_p - 25), \quad (2)$$

$$T_p \llcorner T_{кр} = 7(10^{\llcorner IP}), \quad (3)$$

де:  $P_{25}$  – пенетрація за Річардсоном за  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , 0,1 мм;  $T_p$  – температура розм'якшення за методом «кільця і кулі»;  $T_{кр}$  – температура крихкості за Фраасом.

За системою міжнародних стандартів “Superpave” [6, 24–26], використовуючи динамічний зсувний реометр (DSR) марки “Anton Paar SmartPave Plus Dynamic Shear Rheometer”, було визначено вплив вмісту модифікатора на опір зразків бітумних в'язучих зсувним навантаженням при застосуванні знакозмінного синусоїдального зсувного навантаження [28]. При цьому часовий лаг між прикладеним зусиллям і отриманою деформацією відповідав фазовому куту ( $\delta$ ), а автоматична система збору та реєстрації даних розраховувала величину комплексного модуля зсуву ( $G^*$ ) за формулою:

$$G^* = \left( \frac{2h}{\pi r^4} \right) \cdot \left( \frac{\tau}{\theta} \right), \quad (4)$$

де:  $\tau$  – обертальний момент, Н·м;  $\theta$  – максимальне кутове зміщення, рад.;  $h$  – товщина зразка, м;  $r$  – радіус плити (диска), м.

За результат випробування приймалось середнє арифметичне від значень модуля  $G^*$ , обчислених у кожному з 10 циклів випробувань, а також середнє арифметичне від значень фазового кута ( $\delta$ ), обчислених у кожному з 10 циклів випробувань. Зазначимо, що діаметр обох паралельних плит (дисків) був  $\approx 25$  мм, щілина між плитами  $\approx 1$  мм, частота вібрації рухомої плити  $\nu \approx 10$  рад/с (ця частота імітує навантаження на дорожнє покриття транспортних засобів, що переміщуються зі швидкістю 80 км/год), температуру експерименту варіювали від 58 до 82  $^\circ\text{C}$  із кроком 6  $^\circ\text{C}$ .

Згідно з “Superpave” та стандартом EN 12607–1 [29] і використовуючи «Rolling Thin Film Oven Test» (RTFOT), було проведено короткострокове старіння зразків бітумних в'язучих за  $T \approx 163\text{ }^\circ\text{C}$  впродовж  $\tau \approx 85$  хв, втрата маси зразків після короткострокового старіння не перевищувала 1 %.

Для обох серій зразків полімербітумних в'язучих (вихідних та після короткострокового старіння) за рівнянням 5 було розраховано коефіцієнт ( $k$ ), який зазначає у скільки разів збільшується  $G^*$  залежно від вмісту ТДВ та температури дослідження зразків:

$$k = G^*_{i} / G^*_{нб} \quad (\text{за } T = \text{const}), \quad (5)$$

де:  $G^*_{i}$  та  $G^*_{нб}$  – комплексні модулі зсуву зразків

полімербітумного в'язучого та немодифікованого бітуму відповідно.

За системою “Superpave” для вихідних зразків бітумних в'язучих і зразків після короткострокового старіння було розраховано так званий параметр колійності ( $G^*/\sin\delta$ ), а також визначено показник класу ефективності (PG – Performance Grades) бітумних в'язучих за умови їх експлуатації за високих температур навколишнього середовища. PG визначали за специфікацією “Superpave”, яка зазначає, що для того, щоб дорожнє покриття за максимальної температури його експлуатації витримало транспортне навантаження без утворення колійності, для зразка бітумного в'язучого після короткострокового старіння значення  $G^*/\sin\delta$  повинно бути  $\geq 2,2$  кПа, а для вихідного в'язучого граничне значення  $G^*/\sin\delta$  має бути  $> 1,1$  кПа. Отже, останній температурний експеримент (температуру варіювали від 58 до 82  $^\circ\text{C}$ ), за якого значення  $G^*/\sin\delta$  бітумного в'язучого відповідає вище зазначеним умовам, позначали як високотемпературну складову класу ефективності PG бітумного в'язучого. Наприклад, якщо бітумне в'язуче має клас PG 70-Y, то це означає, що це в'язуче здатне зберігати комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей при нагріванні у зовнішньому середовищі дорожнього покриття до  $T = 70\text{ }^\circ\text{C}$  (включно).

#### Результати досліджень та їх обговорення.

Відомо, що основною метою армування бітумів полімерними добавками, у тому числі типу ТДВ, є полідисперсний розподіл комплексного модифікатора у дисперсійному середовищі асфальтового в'язучого. Як результат – полімербітумні в'язучі та асфальтобетони на їх основі мають підвищену жорсткість, а також стійкість до зсувних і пластичних деформацій за підвищених температур.

Основні фізико-механічні характеристики індивідуального дорожнього бітуму та полімербітумних в'язучих залежно від вмісту ТДВ наведено на рис. 1 і 2. Отримані експериментальні дані чітко свідчать про те, що на відміну від індивідуального бітуму, у зразках полімербітумних в'язучих зі збільшенням вмісту ТДВ (від 3 до 7 % мас.) істотно поліпшуються їхні основні фізико-механічні характеристики, а саме: на 3–13  $^\circ\text{C}$  (з 43 до 56  $^\circ\text{C}$ ) підвищується  $T_p$  (рис. 1а) та, одночасно, у 1,3–1,7 раза зменшується  $P_{25}$  (рис. 1б), також фіксується значне зростання у 1,1–3,3 раза (залежно від вмісту ТДВ)  $IP$  (рис. 2а), який характеризує ступінь колоїдності бітуму, а також має місце значне розширення (на 2,5–14,8  $^\circ\text{C}$ , рис. 2б) інтервалу пластичності ( $T_p - T_{кр}$ ).

Підвищення  $T_p$  (рис. 1а), полімербітумних в'язучих із введенням у бітум і подальшим збільшенням вмісту ТДВ (від 3 до 7 % мас.) свідчить про зростання термостійкості полімербітумних в'язучих, тобто поліпшення їхніх експлуатаційних властивостей і, отже, розширення температурного діапазону працездатності асфальтобетонів, отриманих з використанням цих

модифікованих в'язучих. Відомо, що зменшення величини  $T_p$  бітумів зумовлює зниження їхньої температуростійкості, а асфальтобетонне покриття на основі таких бітумів буде схильне до утворення пластичних (незворотних) деформацій у вигляді хвиль, напливів, колій.

Істотне зменшення величини  $P_{25}$  зі збільшенням вмісту ТДВ у полімербітумних в'язучих (рис. 1б) свідчить про їхню здатність протидіяти проникненню твердого тіла через зростання твердості та жорсткості цих в'язучих і, отже, здатність протидіяти деформаційним навантаженням виготовлених з них асфальтобетонів за підвищених температур. З концентраційної залежності  $P_{25}$  видно, що ця величина мінімальна вже за вмісту 6 % мас. ТДВ, подальше збільшення в бітумі вмісту ТДВ до 7 % мас. величину  $P_{25}$  не змінює, отже для цих полімербітумних в'язучих оптимальна концентрація ТДВ становить  $\approx 6\%$  мас.

Відомо [24], що  $III$  характеризує колоїдні властивості бітумів залежно від температури, оскільки нафтові бітуми є багатокомпонентними колоїдними системами, де

в дисперсійному середовищі, яке переважно складається з мальтенів (мальтени – суміш органічних масел і смол з  $M_w \sim 300-1500$ ), розподілена дисперсна фаза на основі агрегатів асфальтенів (приблизна хімічна формула асфальтенів –  $(C_{79}H_{92}N_2S_2O)_3$ ), які мають вигляд щільно упакованих стопок плоских полярних молекул (із  $M_w \sim 1000-6000$ ) розміром  $\sim 1,2-2,5$  нм і відстанню між стопками  $\sim 0,4$  нм. Отже, з сучасного погляду бітуми можна вважати органічними наноккомпозитами природного походження.

Відомо, що чим вищий  $III$ , тим більша теплостійкість і ширший інтервал пластичності бітумів. Так, бітуми з  $III < -2$  характеризуються підвищеною чутливістю до зміни температури, тому за низьких температур і при короткочасних навантаженнях від коліс автомобільного транспорту вони руйнуються як крихкий матеріал. Бітуми з показниками  $III$  від  $-2$  до  $+2$  менш крихкі і, отже, менш чутливі до зміни температури та здатні зберігати в'язкопружні властивості за низьких температур. Ці бітуми найбільш широко використовуються в дорожньому будівництві.

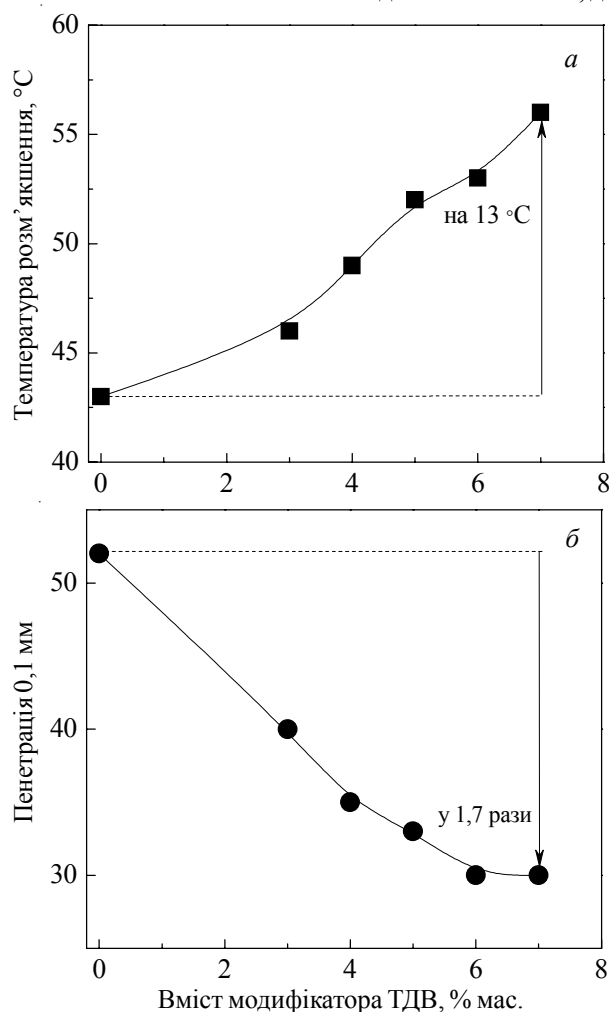


Рис. 1. Вплив вмісту модифікатора ТДВ на температуру розм'якшення (а) та величину пенетрації полімербітумних в'язучих (б)

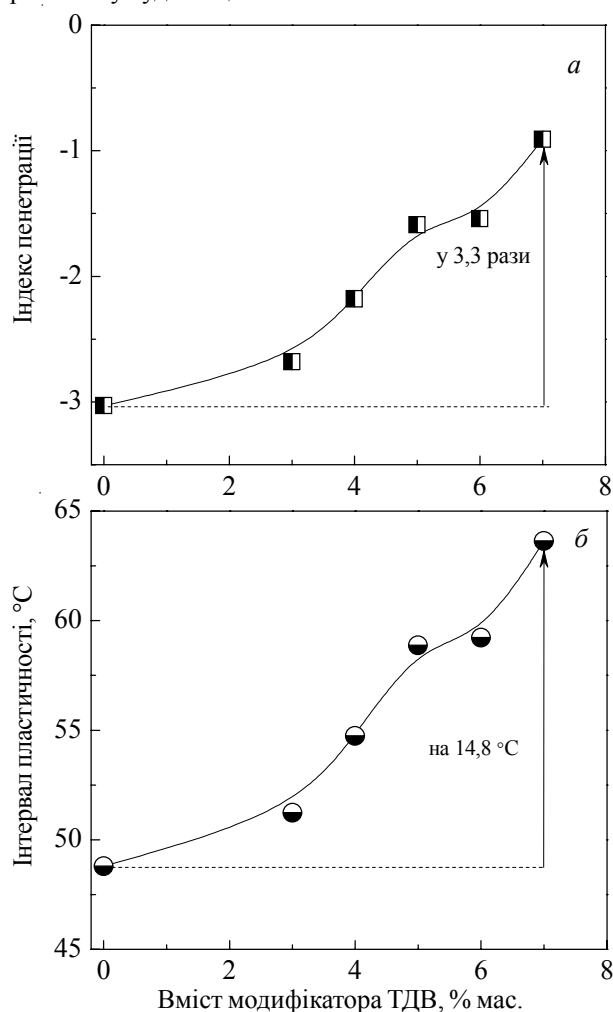


Рис. 2. Вплив вмісту модифікатора ТДВ на індекс пенетрації (а) та інтервал пластичності полімербітумних в'язучих (б)

У досліджених зразках полімербітумних в'язучих величина  $III$  істотно і закономірно зростає зі збільшенням у зразках концентрації ТДВ (рис. 2а), при цьому три зразки мають  $III \geq -2$ : зразки Б5ТДВ ( $III = -1,59$ ), Б6ТДВ ( $III = -1,54$ ) та Б7ТДВ ( $III = -0,91$ ). Встановлено [6], що бітуми з  $III$  від -2 до +2 мають розвинутий просторово-коагуляційний каркас з прошарками дисперсійного середовища, що істотно перешкоджає старінню дорожніх бітумів і підвищує тріщиностійкість автомобільних доріг, збудованих з їх використанням. Можна зробити висновок, що полімербітумні в'язучі Б5ТДВ, Б6ТДВ і Б7ТДВ, які, як зазначено вище, характеризуються підвищеною стійкістю до старіння, найбільш доцільно використовувати у рецептурах асфальтобетонів для будівництва автошляхів з підвищеною стійкістю до утворення тріщин та колійності.

З рис. 2б видно, що зі збільшенням вмісту ТДВ у досліджених зразках полімербітумних в'язучих, істотно розширюється також їхній  $T_p - T_{кр}$ , що, як відомо, зумовлює підвищення тріщиностійкості бітумної складової дорожнього покриття при експлуатації доріг за низьких температур у зимовий час та підвищення їхньої

стійкості проти зсуву, тобто зростання деформаційної стійкості дорожнього полотна за високих температур влітку. Також бітуми з широким інтервалом пластичності характеризуються поліпшеними адгезійними властивостями до мінеральної складової асфальтобетонів.

Оскільки традиційні методи оцінки якості бітумів наприкінці ХХ століття були піддані жорсткій критиці через те, що вони базуються тільки на практичному досвіді та емпіричних залежностях, а не на фундаментальних фізико-хімічних принципах і законах, через що отримані характеристики не відповідають реальним умовам роботи бітумів у дорожніх конструкціях, то у цій роботі для всебічної характеристики розроблених полімербітумних в'язучих, як зазначалось вище, було застосовано новітню систему міжнародних стандартів "Superpave".

У сучасній системі оцінки якості бітумних в'язучих велика увага приділяється визначенню зміни їхніх властивостей з часом як на технологічних стадіях, так і в процесі їх експлуатації. Останнє пов'язане з відомим явищем "старіння" бітумів, яке відбувається під впливом атмосферних факторів (температури, вологи, світла

Таблиця 5. Фізико-механічні характеристики, клас PG дорожнього бітуму та полімербітумних в'язучих

Зв'язуюче	Температура випробувань, °С	Комплексний модуль зсуву, кПа		Фазовий кут, град		Параметр колійності, кПа		Клас PG
		В <sup>а</sup>	З <sup>о</sup>	В <sup>а</sup>	З <sup>о</sup>	В <sup>а</sup>	З <sup>о</sup>	
НБ	58	3,1	9,7	86,0	82,3	3,15	9,75	PG 64-Y
	64	1,4	4,1	86,9	84,6	1,40	4,07	
	70	0,8	1,8	88,1	86,4	0,77	1,78	
Б3ТДВ	58	6,0	20,5	85,0	78,1	6,04	20,9	PG 70-Y
	64	2,6	8,6	86,5	81,3	2,56	8,69	
	70	1,2	3,8	87,6	83,7	1,17	3,80	
	76	0,6	1,76	88,5	85,5	0,57	1,76	
Б4ТДВ	58	8,8	31,2	80,7	75,1	8,95	32,30	PG 70-Y
	64	3,9	13,6	82,7	77,9	3,96	13,86	
	70	1,9	6,1	83,8	80,0	1,87	6,19	
	76	0,9	2,9	84,1	81,2	0,94	2,97	
	82	-	1,5	-	81,9	-	1,52	
Б5ТДВ	58	15,1	31,0	71,4	75,9	15,92	31,99	PG 76-Y
	64	7,7	13,2	71,4	79,7	8,08	13,43	
	70	4,1	5,8	70,7	82,4	4,31	5,89	
	76	2,4	2,7	68,9	84,4	2,57	2,73	
	82	1,5	1,3	67,5	85,8	1,65	1,34	
Б6ТДВ	58	21,8	43,2	62,9	73,0	24,52	45,21	PG 76-Y
	64	12,0	19,0	62,7	76,7	13,51	19,51	
	70	7,2	8,6	61,9	79,6	8,19	8,75	
	76	4,6	4,1	60,9	81,6	5,29	4,12	
	82	3,2	2,0	60,4	83,0	3,63	2,06	
Б7ТДВ	58	27,9	49,4	54,9	71,2	34,16	52,19	PG 82-Y
	64	17,3	22,4	53,5	74,9	21,51	23,24	
	70	11,5	10,4	52,7	77,9	14,42	10,60	
	76	8,2	5,0	52,5	80,3	10,28	5,08	
	82	6,1	2,6	53,0	82,0	7,62	2,58	

<sup>а</sup>Вихідні зразки; <sup>б</sup>Зістарені зразки.

тощо), що спричиняють зміни хімічного складу бітумів, внаслідок чого їхні складові змінюються, переходячи частково з одних видів в інші: масла перетворюються на смоли, а смоли – на асфальтени. Як результат, істотно змінюється весь комплекс фізико-механічних властивостей бітумів. Процес перетворення масел у смоли йде значно повільніше, ніж перетворення смол в асфальтени. Отже, з плином часу в бітумі збільшується кількість асфальтенів. Кількість же смол, які надають бітуму пластичність і тягучість, з часом зменшується. У міру накопичення асфальтенів поступово послаблюється пластичність бітуму та посилюється його крихкість, тобто відбувається “старіння” бітуму, що спричиняє “старіння” асфальтобетону, яке значно погіршує властивості дорожнього покриття, оскільки зростаюча з плином часу крихкість бітуму робить асфальтовий бетон також більш крихким: асфальтобетон значною мірою втрачає здатність до сприйняття напружень розтягнення, а в зимовий час при різких зниженнях

температури спостерігається утворення тріщин. Підвищена крихкість асфальтобетону підсилює процес його викришування, що знижує термін служби дорожнього покриття.

Як зазначалось вище, за системою стандартів “Supergave” для вихідних зразків бітуму та полімербітумних в’язучих, а також зразків після короткострокового старіння, було визначено  $G^*$  і  $\delta$ , розраховано  $G^*/\sin \delta$ , а також визначено PG бітумних в’язучих за умови їх експлуатації за високих температур навколишнього середовища. Отримані дані наведено у табл. 5 і на рис. 3.

Результати проведених реологічних досліджень, безсумнівно, свідчать про те, що введення ТДВ як модифікатора у бітум і збільшення його вмісту при створенні полімербітумних в’язучих, наприклад до 7% мас., зумовлює зростання  $k$  у 9,0–14,4 рази (за температури випробувань 58–70 °C відповідно, рис. 3а), зростання  $G^*$  та зменшення значень  $\delta$  на 31,1–35,4° (за аналогічних температур випробувань, табл. 5). Відомо [6], що збільшення величини  $G^*$  бітумної складової асфальтобетонів зумовлює зростання опірності до зсуву дорожнього покриття при навантаженні на нього транспортних засобів, що переміщуються з середньою швидкістю 80 км/год, а зменшення значень  $\delta$  свідчить про поліпшення еластичної реакції асфальту під навантаженням. Отже, можна зробити висновок, що використаний нами модифікатор ТДВ позитивно впливає на реологічну поведінку бітумного в’язучого, що в подальшому забезпечить стабілізацію та підвищення еластичності дорожнього покриття. Це зумовлено, одночасно, як наявністю у складі ТДВ досить високомодульного (за рахунок великої довжини і розвиненої надмолекулярної структури полімерних ланцюгів) ПЕНТ<sub>в</sub> та еластичних частинок ЕПДМ і деульканізованого РПШГ, так і ефективним розподілом ТДВ у дисперсійному середовищі асфальтового в’язучого. Цей висновок підтверджується також збереженням після короткострокового старіння усіма дослідженими зразками полімербітумних в’язучих достатньо високих (порівняно з “зістареним” немодифікованим бітумом) значень  $G^*$  (рис. 3б) і менших значень  $\delta$  (табл. 5). Так, наприклад, для “зістареного” зразка полімербітумного в’язучого Б7ТДВ,  $G^*$  у  $k \approx 5,1$ – $5,8$  рази залишається більшим, а  $\delta$  на 11,1– $8,5^\circ$  меншим (за температури випробувань 58–70 °C відповідно) порівняно зі зразком “зістареного” НБ. Отже, використання цих ТДВ як модифікаторів бітуму уповільнює також процеси “старіння” бітуму, особливо за високих температур його експлуатації.

Як видно з даних табл. 5, застосування розробленого на основі вторинних полімерів комплексного модифікатора ТДВ для модифікації дорожнього бітуму істотно підвищує також параметр  $G^*/\sin \delta$ , зрештою, високотемпературну складову PG усіх досліджених полімербітумних в’язучих, при цьому чим вищий вміст ТДВ і температура випробувань, тим більше зростання

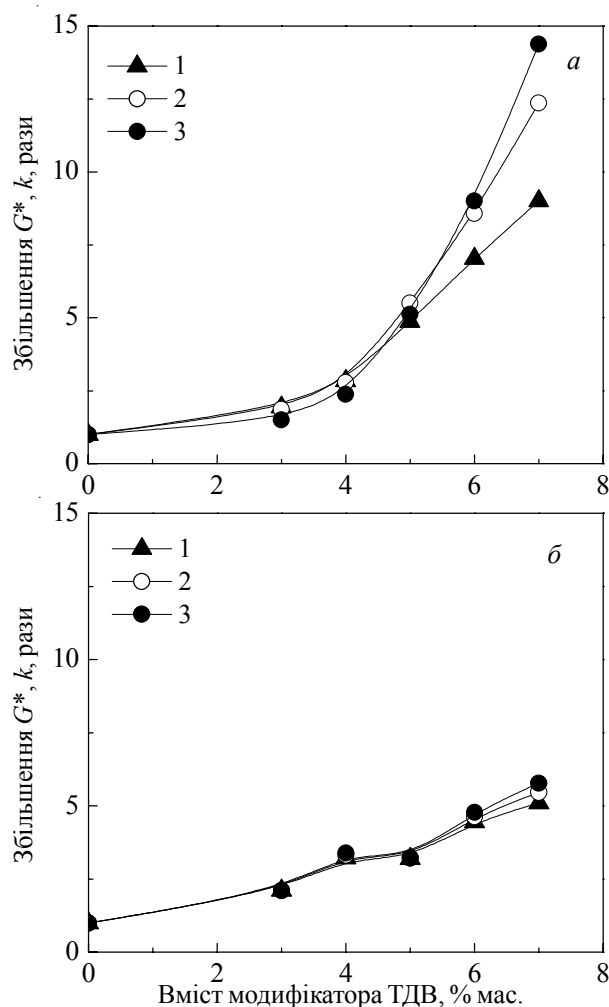


Рис. 3. Збільшення комплексного модуля зсуву  $G^*$  ( $k$ ) для вихідних зразків полімербітумних в’язучих (а) та аналогічних зразків після короткострокового старіння (б) залежно від вмісту ТДВ і температури досліджень: 54 (1); 64 (2) і 70 °C (3)

вказаних показників. Так, порівняно з немодифікованим бітумом, зразок полімербітумного в'язучого Б7ТДВ за температури випробувань 58–70 °С відповідно має більший у 10,8–18,7 раза (розраховували за аналогією з рівнянням 5) параметр  $G^*/\sin \delta$  та істотно вищий РГ 82-У (на відміну від РГ 64-У для індивідуального бітуму). Як зазначалось вище, позначення марки полімербітумного в'язучого, наприклад РГ 82-У, означає, що цей зразок в'язучого буде ефективно працювати за температури дорожнього покриття до 82 °С (включно).

Отже, проведені дослідження, безсумнівно, свідчать про перспективність застосування полімербітумних в'язучих, розроблених із використанням комплексного модифікатора зі структурою термопластичного динамічного вулканізата, ТДВ, отриманого на основі вторинних РПШГ і ПЕНТ<sub>в</sub>, а також ЕПДМ, у дорожньому покритті автошляхів для подовження його ресурсу, підвищення зсувостійкості, супротиву утворенню колійності, а також стійкості до дії високих температур зовнішнього середовища, що на сьогодні є нагальним питанням з огляду на глобальне потепління, що вже почалося навколо.

#### Висновки.

Якість доріг з асфальтобетону, перш за все, визначається фізико-хімічними та механічними властивостями бітуму. В цій роботі досліджено вплив на фізико-механічні характеристики полімербітумних в'язучих на основі дорожнього бітуму комплексного модифікатора зі структурою термопластичного динамічного вулканізата (ТДВ), отриманого динамічною вулканізацією реактивованої подрібненої шинної гуми (РПШГ), у термопластичній матриці вторинного поліетилену низького тиску (ПЕНТ<sub>в</sub>) та етилен-пропілен-дієнового мономеру (ЕПДМ). Із застосуванням традиційних методів та європейських стандартів, а також сучасної системи міжнародних стандартів "Superpave" встановлено,

що введення ТДВ у дорожній бітум зумовлює підсилення комплексу фізико-механічних показників отриманих полімербітумних в'язучих залежно від вмісту ТДВ. Так, на відміну від індивідуального бітуму, у зразках полімербітумних в'язучих зі збільшенням вмісту ТДВ від 3 до 7% мас. зафіксовано: підвищення на 3–13 °С величини температури розм'якшення ( $T_p$ ), зменшення в 1,3–1,7 раза величини пенетрації ( $II_{25}$ ) і, відповідно, підвищення в 1,1–3,3 раза індекса пенетрації ( $III$ ). Також для створених полімербітумних в'язучих зафіксовано значне підвищення комплексного модуля зсуву ( $G^*$ ), параметра колійності ( $G^*/\sin \delta$ ) та високотемпературної складової класу ефективності (РГ) зі збільшенням вмісту ТДВ. Так, порівняно з немодифікованим бітумом, зразок Б7ТДВ, що містить 7% мас. ТДВ, за температури випробувань  $T = 58–70$  °С відповідно має більші у 9,0–14,4 раза модуль  $G^*$  та у 10,8–18,7 раза параметр  $G^*/\sin \delta$ ; також зафіксовано істотне підвищення класу ефективності до РГ 82-У (на відміну від РГ 64-У для індивідуального бітуму), що забезпечить ефективну роботу зразка в'язучого Б7ТДВ за температури дорожнього покриття до 82 °С (включно). Встановлено також, що використання цих ТДВ як модифікаторів бітуму уповільнює процеси його "старіння", особливо за високих температур його експлуатації. Отже полімербітумні в'язучі, розроблені з використанням комплексного модифікатора зі структурою ТДВ, перспективні при застосуванні у дорожньому покритті для подовження його ресурсу, підвищення зсувостійкості, супротиву утворенню колійності, а також стійкості до дії високих температур зовнішнього середовища.

**Подяка.** *Автори роботи висловлюють щирю подяку за фінансову підтримку роботи НАН України (проект Р7.7-2018 цільової програми наукових досліджень НАН України "Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд" (Ресурс-2).*

## Література

1. Internet resource: <https://news.finance.ua/ua/news/-/444116/shho-bude-z-dorogamy-v-2019-rotsi-hajvej-dogdanska-i-remont-yam>
2. Internet resource: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2018/06/4/637414/>
3. *Stepura V.S., Belyatynskiy A.O., Kuzhel N.V. Osnovy ekspluatatsii avtomobilnyh dorog i aerodromiv. Kyiv: NAU (Ukr.), 2013: 204. ISBN 978-966-598-833-5*
4. *Khimerik T.Yu., Krayushkina K.V., Belyatynskiy A.O. Likvidatsiya koliynosti – zasib pidvyshchennya dovgovichnosti dorozhnyogo odyagu. Zbirnyk naukovykh prats, Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnytstvo, PoltNTU (Ukr.), 2016, 1, no. 46, 263-270.*
5. *Sheludenko B.A., Sheludenko L.S. Mekhanika kontaktnogo ruynuvannya avtomobilnyh dorog. Kamyanets-Podilskiy: Kaligraf LTD, 2016: 66.*
6. *Zolotarev V.A. Dorozhnye bitumnye vyazhushchie i asfaltobeton. Kh.: KhNAHU, 2014: 180. ISBN-978-966-303-567-3.*
7. *Pyryg Y., Galkin A., Svytnarov M., Koriuk V., Ilyin Y., Zolotariov V. Asphaltpolymer-concrete made by adding polymer directly in a mixture, Bulletin of KhNADU (Ukr.), 2015, 68: 85-91. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/1137>*
8. *Perez-Lepe A., Martánez-Boza F.J., Gallegos C., Gonzales O., Munoz M.E., Santamaria A. Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen. Fuel, 2003, 82, no. 11: 1339-1348. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00065-6)*
9. *Xiaohu L., Isacsson U. Modification of road bitumens*



- with thermoplastic polymers, *Polym. Test.*, 2000, **20**, no 1: 77-86. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0)
10. *Hinislioglu S., Agar E.* Use of waste high-density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Mat. Lett.*, 2004, **58**, no 3-4: 267-271. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)
11. *Casey D., McNally C., Gibney A., Gilchrist M.D.* Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, **52**, no 10: 1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.002>
12. *Chiu C.-T.* Use of ground tire rubber in asphalt pavements: Field trial and evaluation in Taiwan, *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, **52**, no 3: 522-532. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.006>
13. *Navarro F.J., Partal P., Martinez-Boza F., Gallegos C.* Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens, *Fuel*, 2004, **83**, no 14-15: 2041-2049. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.003>
14. *Grygoryeva O.P., Fainleib O.M., Mozgovyy V.V., Kolesnyk Yu.R.* Method of utilization of tire cord, Ukrainian Patent 91636, August 10, 2010.
15. *Ahmedzade P., Fainleib A., Gunay T., Grygoryeva O.* Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene, *Constr. Build. Mat.*, 2014, **69**, no 1: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.027>
16. *Ahmedzade P., Fainleib A., Gunay T., Grigoryeva O., Kultayev B., Starostenko O.* Influence of ion irradiated recycled polyethylene on physical properties of bituminous binder. *Adv. Mat. Res.*, 2015, **1125**: 360-364. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1125.360>
17. *Ahmedzade P., Гьнай Т., Altun S., Kultayev B., Fainleib A., Grigoryeva O., Starostenko O.* Usage of ion-irradiated recycled polypropylene as modifier in bituminous binder. In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Eds.: *A. Loizos, I. Al-Qadi, T. Scarpas*. London: Taylor & Francis Group, 2017: 394. ISBN 978-1-138-29595-7.
18. *Chernov S.A., Kaklyugin A.V., Nikitina A.N., Golyubin K.D.* Vliyanie polimerno-dispersno-armiruyushchey dobavki na ekspluatatsionnye svoystva asfaltobetona. *Vestnik MGSU (Rus.)*, 2017, no. 6: 654-660.
19. *Grigoryeva O., Fainleib A., Tolstov A., Starostenko O., Lievana E., Karger-Kocsis J.* Thermoplastic elastomers based on recycled HDPE, EPDM and ground tire rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2005, **95**: 659-671. <https://doi.org/10.1002/app.21177>
20. European Standard EN 12591:2009, Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.
21. European Standard EN 1426:2007, Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration.
22. European Standard EN 1427:2007, Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method.
23. European Standard EN 14023:2005 Bitumen and bituminous binders - Framework specification for polymer modified bitumens.
24. *Study for a Future Strategic Highway Research Program Project Description*. Web page on the TRB web site. National Academy of Sciences. Washington D.C. <http://www4.trb.org/trb/newshrp.nsf>. Accessed 18 November 2001.
25. *Superpave System*. Web page on the NECEPT web site. The Pennsylvania Transportation Institute, Pennsylvania State University. University Park, PA. Accessed 18 November 2001.
26. Internet resource: <https://www.telko.com/ru/articles/superpave-методы-испытания-битумного-вяжущего>
27. *Blajeyovskiy K., Olshackiy Y., Pechakovskiy H.* Bitumnyy spravochnik (Rus.): Chemikow, Plock, Poland, 2014, 142 p.
28. AASHTO TP5-97. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).
29. European Standard EN 12607-1. Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 1: RTFOT method.

Надійшла до редакції 10 липня 2019 р.

## Продление ресурса дорожного покрытия путем модификации битума термопластичным динамическим вулканизатом на основе отходов полимеров

О.П. Григор'єва<sup>1</sup>, P. Akhmedzade<sup>2</sup>, S.H. Kasanagh<sup>2</sup>, O.H. Старостенко<sup>1</sup>, A.M. Файнлейб<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины

48, Харьковское шоссе, Киев, 02160, Украина

<sup>2</sup>Эгейский университет, Борнова, Измир, Турция

*Исследовано влияние комплексного модификатора со структурой термопластичного динамического вулканизата (ТДВ), полученного динамической вулканизацией реактивированной измельченной шинной резины (РИШР) в термопластической матрице из вторичного полиэтилена низкого давления (ПЭНДв) и этилен-пропилен-диенового мономера (ЭПДМ), на физико-механические характеристики полимербитумных вяжущих на основе дорожного битума. Применяя традиционные методы и европейские стандарты, а также используя современную систему международных стандартов "Superpave", установлено, что введение в дорожный битум разработанного комплексного модификатора обеспечивает усиление комплекса физико-механических показателей, полученных полимербитумных вяжущих, в зависимости от содержания ТДВ. Так, в отличие от индивидуального битума, в образцах полимербитумных вяжущих с увеличением содержания ТДВ от 3 до 7 % мас. зафиксировано: повышение на 3–13 °С величины температуры размягчения ( $T_p$ ), уменьшение в 1,3–1,7 раза величины пенетрации ( $P_{25}$  при  $T = 25$  °С) и соответствующее повышение в 1,1–3,3 раза индекса пенетрации (ИП). Также для созданных полимербитумных вяжущих зафиксировано значительное повышение комплексного модуля сдвига ( $G^*$ ), параметра колейности ( $G^*/\sin \delta$ ) и высокотемпературной составляющей класса эффективности PG (PG-Performance Grades) с увеличением содержания ТДВ. Так, например, по сравнению с немодифицированным битумом, образец полимербитумного вяжущего, содержащего 7 мас. % ТДВ, при температурах испытаний 58–70 °С, соответственно, имеет большие в  $k \approx 9,0$ –14,4 раза значения модуля  $G^*$  и больший в 10,8–18,7 раза параметр колейности  $G^*/\sin \delta$ ; также зафиксировано существенное повышение класса эффективности до PG 82-Y (в отличие от PG 64-Y для индивидуального битума), что означает, что данный образец вяжущего будет эффективно работать при температуре дорожного покрытия вплоть до  $\approx 82$  °С (включительно). Сделан вывод о перспективности применения полимербитумных вяжущих, разработанных с использованием комплексного модификатора со структурой ТДВ, в дорожном покрытии для продления его ресурса, повышения сдвигоустойчивости, сопротивления образованию колейности, а также устойчивости к воздействию высоких температур внешней среды.*

**Ключевые слова:** термопластичные динамические вулканизаты, вторичные полиэтилен и шинная резина, дорожный битум, полимербитумное вяжущее, физико-механические свойства.

## Extension of the pavement service life by bitumen modification with thermoplastic dynamic vulcanizates based on polymer wastes

O.P. Grigoryeva<sup>1</sup>, P. Akhmedzade<sup>2</sup>, S.H. Kasanagh<sup>2</sup>, O.M. Starostenko<sup>1</sup>, A.M. Fainleib<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of macromolecular chemistry of the NAS of Ukraine  
48, Kharkivs'ke shose, Kyiv, 02160, Ukraine

<sup>2</sup>Ege University, Bornova, Izmir, Turkey

*The effect of a complex modifier with the structure of thermoplastic dynamic vulcanizate (TDV) obtained by dynamic vulcanization of reactivated ground tire rubber (RGTR) in a thermoplastic matrix of the recycled high density polyethylene (HDPE<sub>n</sub>) and a copolymer of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) on the physical and mechanical characteristics of the polymer-bitumen binders based on a road bitumen is studied. By means of traditional methods and European standards, as well as using the modern international system of international standards "Superpave", it is established that addition of this complex modifier to the bitumen provides, depending on the TDV content, strengthening of the complex of physical and mechanical parameters of the polymer-bitumen binders obtained. Thus, in contrast to the individual bitumen, in the samples of polymer-bitumen binders with increasing the TDV content from 3 to 7 wt.% an increase in the value of the softening temperature ( $T_s$ ) by 3–13 °C, decreasing of 1,3–1,7 times of the penetration value ( $P_{25}$ , at  $T = 25$  °C) and a corresponding increase of 1,1–3,3 times of the penetration index (IP). Additionally, for the polymer-bitumen binders created significant increase of the complex shear modulus ( $G^*$ ) and the rutting parameter ( $G^*/\sin \delta$ ), as well as high-temperature part of Performance Grades (PG) with increasing TDV content have been fixed. Thus for the polymer-bitumen binder sample with 7 wt.% TDV in comparison with unmodified bitumen the modulus  $G^*$  was found to be higher by  $k \approx 8$ –13,4 times, the rutting parameter  $G^*/\sin \delta$  increased by 9,8–17,7 times, and finally a significant increase of high-temperature part of Performance Grades (PG) of bitumen binders from PG 64-Y for unmodified bitumen binder to PG 82-Y for the polymer-bitumen binder have been observed. Therefore, this sample of binder will work effectively at a pavement temperature up to  $T \approx 82$  °C. The conclusion is made about the prospects of using the polymer-bitumen binders developed applying complex modifier of TDV structure in the pavements to extend their service life, increase resistance to shear loads, resistance to the formation of ruts, as well as resistance to high ambient temperatures.*

**Keywords:** thermoplastic dynamic vulcanizates, recycled polyethylene and post-consumer tire rubber, road bitumen, polymer-bitumen binder, physical-mechanical properties.