

В.М. ГУНЬКА, Ю.М. ГРИНЧУК, Ю.В. ПРИСЯЖНИЙ, Ю.В. СІДУН, Ю.Я ДЕМЧУК, М.Ю. ВОЛИНЕЦЬ

АСФАЛЬТОБЕТОННІ СУМІШІ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАФТОВИХ ЗАЛИШКІВ І БІТУМІВ, МОДИФІКОВАНИХ МАЛЕЇНОВИМ АНГІДРИДОМ ТА ПОЛІЕТИЛЕНГЛІКОЛЯМИ

Під час виробництва та застосування нафтових дорожніх бітумів виникає ряд проблем. Наприклад, незадовільні експлуатаційні характеристики, в основному теплостійкість, пластичність, еластичність та адгезія між в'язучим та поверхнею мінерального матеріалу. При збільшенні інтенсивності дорожнього руху, зростанні обсягів великовантажних перевезень, маси автомобілів, разом із впливом на конструкцію погодно-кліматичних факторів, це призводить до руйнування дорожнього покриття. Одним з найперспективніших напрямків в підвищенні якості в'язучих для одержання дорожніх покриттів з покращеними експлуатаційними характеристиками є їх модифікування полімерними матеріалами. Однак, використання модифікаторів обмежується внаслідок значної їх вартості. Тому важливим є пошук недорогих речовин, які б покращували експлуатаційні характеристики бітумів. Робота присвячена абсолютно новому в'язучому для асфальтобетонних сумішей, зокрема і щебеневомо-мастикових. Як в'язучий матеріал використовували сировину для виробництва бітумів – гудрону, що модифіковані малеїновим ангідридом та поліетиленгліколем. Проведено проектування щебеневомо-мастикових асфальтобетонних сумішей із використанням одержаних в'язучих матеріалів та формування із них зразків щебеневомо-мастикових асфальтобетонів та їх випробування. Встановлено, що при одержанні в'язучих матеріалів із гудрону, внаслідок модифікування його послідовно малеїновим ангідридом та поліетиленгліколем, одержано щебеневомо-мастикові суміші із нижчими показниками міцності у порівнянні із в'язучими матеріалами отриманими модифікуванням окисненого бітуму. Порівняння щебеневомо-мастикових сумішей одержаних із використанням бітумів, модифікованих SBS та досліджуваних в'язучих показало, що досліджувані в'язучі матеріали (окиснений бітум, модифікований малеїновим ангідридом та малеїнований окиснений бітум, модифікований поліетиленгліколем) характеризуються меншим водонасиченням та міцністю у порівнянні із використанням окисненого бітуму, модифікованого SBS.

Ключові слова: дорожній бітум; малеїновий ангідрид; поліетиленгліколь; адгезія; асфальтобетон

V. M. GUNKA, Yu. M. HRYNCHUK, Yu. V. PRYSIAZHNYI, Iu. V. SIDUN, Yu. Y. DEMCHUK, M. Y. VOLYNETS

ASPHALT MIXTURES AND ASPHALT CONCRETE USING OIL RESIDUES AND BITUMEN MODIFIED WITH MALEIC ANHYDRIDE AND POLYETHYLENE GLYCOLS

A number of problems arise during the production and use of petroleum road bitumen. One of them is unsatisfactory performance characteristics, mainly heat resistance, plasticity, elasticity, and adhesion between the binder and the surface of the mineral material. With the increase in traffic intensity, the growth of heavy traffic volumes, the weight of cars, along with the impact of weather and climatic factors on the structure, this leads to the destruction of the road surface. One of the most promising areas in improving the quality of binders to obtain pavements with improved performance characteristics is their modification with polymeric materials. However, the use of modifiers is limited due to their high cost. Therefore, it is important to find inexpensive substances that would improve the performance characteristics of bitumen. This work is devoted to a completely new binder for asphalt mixtures, including crushed stone mastic mixtures. As a binder, we used raw materials for the production of bitumen - tar, modified with maleic anhydride and polyethylene glycol. The design of crushed stone and mastic asphalt mixtures using the obtained binders was carried out, and samples of crushed stone and mastic asphalt concrete were formed from them and tested. It was found that when binders were obtained from tar by modifying it with maleic anhydride and polyethylene glycol, crushed stone mastic mixtures with lower strength values were obtained compared to binders obtained by modifying oxidized bitumen. Comparison of crushed stone and mastic mixtures obtained using SBS modified bitumen and the studied binders showed that the use of the studied binders (oxidized bitumen modified with maleic anhydride and maleinized oxidized bitumen modified with polyethylene glycol) is characterized by lower water saturation and strength compared to the use of oxidized bitumen modified with SBS.

Keywords: road bitumen; maleic anhydride; polyethylene glycol; adhesion; asphalt concrete

В.М. ГУНЬКА, Ю.М. ГРИНЧУК, Ю.В. ПРИСЯЖНИЙ, Ю.В. СІДУН, Ю.Я ДЕМЧУК, М.Ю. ВОЛИНЕЦЬ

АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ СМЕСИ И АСФАЛЬТОБЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ И БИТУМОВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАЛЕИНОВЫМ АНГИДРИДОМ И ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯМИ

При производстве и применении нефтяных дорожных битумов возникает ряд проблем. Например, неудовлетворительные эксплуатационные характеристики, в основном теплостойкость, пластичность, эластичность и адгезия между вяжущим и поверхностью минерального материала. При увеличении интенсивности дорожного движения, росте объемов большегрузных перевозок, массы автомобилей, вместе с воздействием на конструкцию погодно-климатических факторов, это приводит к разрушению дорожного покрытия. Одним из самых перспективных направлений в повышении качества вяжущих для получения дорожных покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками является их модифицирование полимерными материалами. Однако, использование модификаторов ограничивается вследствие значительной их стоимости. Поэтому важным является поиск недорогих веществ, которые бы улучшали эксплуатационные характеристики битумов. Работа посвящена совершенно новому вяжущему для асфальтобетонных смесей, в том числе и щебеночно-мастичных. В качестве вяжущего материала использовали сырье для производства битумов - гудроны, модифицированные малеиновым ангидридом и полиетиленгліколем. Проведено проектирование щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с использованием полученных вяжущих материалов и формирование из них образцов щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и их испытания. Установлено, что при получении вяжущих материалов из гудрона, в результате модифицирования его последовательно малеиновым ангидридом и полиетиленгліколем, получены щебеночно-мастичные смеси с более низкими показателями прочности по сравнению с вяжущими материалами полученными модифицированием окисленного битума. Сравнение щебеночно-мастичных смесей полученных с использованием битумов, модифицированных SBS и исследуемых вяжущих показало, что исследуемые вяжущие материалы (окисленный битум, модифицированный малеиновым ангидридом и малеинизированный окисленный битум, модифицированный полиетиленгліколем) характеризуются меньшим водонасыщением и прочностью по сравнению с использованием окисленного битума, модифицированного SBS.

Ключевые слова: дорожний бітум; малеїновий ангідрид; поліетиленгліколь; адгезія; асфальтобетон

Вступ. Традиційні асфальтобетони, на основі немодифікованих бітумів, не можуть забезпечити необхідні фізико-механічні характеристики дорожніх покриттів та їх тривалу службу. Тому є необхідність у покращенні якості матеріалів та надійності експлуатації шарів дорожнього одягу. Один із ефективних способів вирішення цієї проблеми полягає у поліпшенні структури та властивостей бітумів шляхом використання доступних за ціною модифікаторів різних видів [1-3].

Процеси модифікації нафтових залишків можна поділити на фізичні та хімічні. Фізична модифікація нафтових залишків передбачає додавання різних компонентів для покращення експлуатаційних характеристик, при цьому хімічна структура залишків залишається незмінною [4, 5]. Використання модифікаторів фізичної дії має свої недоліки, такі як низька термічна стабільність та проблеми з однорідністю бітум-полімерних сумішей, тому перевагу слід віддавати хімічній модифікації. Хімічна модифікація нафтових залишків включає в себе зміну їх хімічної структури за допомогою модифікатора, зазвичай у присутності каталізатора чи ініціатора. В результаті отримують продукти з покращеними експлуатаційними властивостями в порівнянні з вихідними нафтовими залишками. Хімічна модифікація нафтових залишків, загалом, та бітумів, зокрема, менше досліджена та використовується в менших масштабах, ніж фізична модифікація. Проте досить часто завдяки хімічному модифікуванню вдавалося отримувати результати, які є не гіршими, а іноді навіть кращими з точки зору експлуатаційних характеристик продуктів модифікування [6-9].

Серед хімічних модифікаторів, які в даний час активно використовуються для поліпшення та збереження вихідних властивостей нафтових бітумів, важливе місце належить класу реактопластів. Зокрема, найширше використовуються реактивні терполімери (РЕТ) [10], епоксидні смоли [11], феноло-формальдегідні [12] та поліефірні смоли [13].

Також відомо, що серед ефективних модифікаторів нафтових бітумів виступають малеїновий ангідрид та поліетиленгліколь. В попередніх дослідженнях було встановлено, що вплив малеїнового ангідриду та малеїнового ангідриду разом з ПЕГ на еластичність бітуму є ключовим і залежить від умов модифікації. Дослідження підтвердило, що найоптимальнішим ПЕГ для модифікації малеїнованого бітуму, з точки зору забезпечення високої еластичності бітуму, є ПЕГ 2000. При цьому оптимальні умови модифікації включають наступне: перший етап проводиться при температурі 130 °С і тривалості 1,0 год; другий етап – при температурі 180 °С і тривалості 2,0 год; вміст МА в бітумі складає 2,0% від загальної маси бітуму, а вміст ПЕГ-2000 – 4,0%.

Дана стаття також описує продовження проведених досліджень, зокрема процес отримання та тестування асфальтобетонних сумішей і в результаті отримання модифікованих бітумних в'язучих матеріалів, які використовуються у складі кінцевого

асфальтобетонного покриття.

Отже, метою даної роботи є встановлення можливості застосування малеїнованих дорожніх бітумів поліетиленгліколями з одержанням асфальтобетонів, які володітимуть меншою водонасиченістю та міцністю за 20 та 50 °С.

Методика дослідження. Для формування асфальтобетонів використовували дорожній нафтовий бітум, модифікований малеїновим ангідридом і поліетиленгліколями. Поширений опис процесу отримання таких модифікованих бітумів можна знайти в літературних джерелах [14].

У таблиці 1 представлені результати модифікування дорожнього нафтового бітуму малеїновим ангідридом і поліетиленгліколями.

Під час модифікації гудрону (Г1) за допомогою малеїнового ангідриду був отриманий в'язкий бітум, який відповідає марці БНД 70/100 згідно з ДСТУ 4044:2019, з температурою розм'якшення 47,6 °С та вищим показником Е25 порівняно з окисненим бітумом БО2 (25,5 %). Іншими словами, технологія модифікації гудрону за допомогою малеїнового ангідриду може бути альтернативою традиційному методу отримання в'язких нафтових бітумів шляхом окиснення.

Таблиця 1 – Теплостійкі характеристики дорожнього нафтового бітуму, модифікованого МА і ПЕГ

Показник	БО2	Г1	БОМА-130-3	БОМА-160	БОМА/ПЕГ-400-160	БОМА/ПЕГ-2000-160	ГМА-160	ГМА/ПЕГ-400-160	ГМА/ПЕГ-2000-160	Вимоги згідно ДСТУ 9161:2021 та ДСТУ 9133:2021
Р25, дмм	82	247	37	48	46	57	95	86	78	–
ТР, °С	47,2	39,0	62,2	56,2	57,8	58,0	47,6	46,2	46,8	–
*Д25, см	>150	58,1	18,5	22,0	26,5	17,1	26,3	66,4	49,6	–
ТК, °С	-12	-18	-11	-10	-11	-14	-17	-18	-20	–
Е25, %	10,5	–	36,1	28,1	40,8	46,2	25,5	36,4	39,1	≥ 55
П, °С	59,2	57,0	73,2	66,2	68,8	72,0	64,6	64,2	66,8	–
Індекс пенетрації	– 0,71	0,62	0,73	-0,39	0,37	0,95	– 0,16	– 0,87	– 0,97	–
Адгезія з поверхню скла, %	29	42	92	87	94	90	77	96	93	≥ 75
Адгезія з поверхню щебеню (Щ1), балів	3,0	2,5	5,0	5,0	4,5	5,0	4,5	5,0	4,5	≥ 4,5

* При Д25 < 20 см показник Е25 визначали відразу після Д25.

Для визначення зчеплення нафтових залишків і бітумів з поверхнею кам'яного мінерального матеріалу, згідно з ДСТУ 8787:2018 та ДСТУ EN 12697-11:2018, було використано гранітний щебінь (Щ1), який був видобутий з природного каменю та відповідав необхідним фракціям. Цей щебінь був отриманий від ТОВ «Новоград-Волинський каменедробильний завод».

Результати дослідження. За допомогою гранулометричних кривих щільних непереривчастих сумішей було підібрано зерновий скелет АБС, який проектували згідно ДСТУ Б В.2.7-119:2011 виходячи з наступних характеристик: асфальтобетон гарячий дрібнозернистий щільний із залишковою пористістю від 2 до 5 % мас., з кількістю зерен більше ніж 5 мм – 45-55 % мас. та максимальним розміром зерен до 20 мм. Підібрані склади ЩМАС-15 та ЩМАС-20 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Склад ЩМАС-15 та ЩМАС-20

Матеріал	Вміст, % мас.	
	ЩМАС-15	ЩМАС-20
Щебінь, фракція 10-20 мм	–	57,0
Щебінь, фракція 10-15 мм	50,0	–
Щебінь, фракція 5-10 мм	20,0	21,0
Щебневий відсів, фракція 0,071-5 мм	15,0	11,0
Вапняковий мінеральний порошок марки МП І згідно ДСТУ Б В.2.7-121:2014	15,0	11,0
Разом	100,0	100,0
Целюлозна стабілізуюча добавка Celbit згідно ДСТУ Б В.2.7-127:2015	0,4	0,3
Бітум	6,5	5,3

В складі ЩМАС-15 та ЩМАС-20, які вказані у таблиці 2, є змінними лише типи бітумних матеріалів, згідно з таблицями 3 та 4. Вміст в'язкого компонента в ЩМАС-15 був постійним при різних варіантах використання в'язкого компонента.

Температурні режими для виготовлення і ущільнення ЩМАС-15 відповідали вимогам, вказаним у таблиці 5 ДСТУ Б В.2.7-127:2015 та таблиці 2 ДСТУ Б В.2.7-319:2016.

Ущільнення ЩМА-20 здійснювалося за допомогою гіраторного компактора В041М (Matest, Італія) відповідно до ДСТУ EN 12697-31:2021. Температура виготовлення була постійною для всіх досліджених сумішей і становила 160 °С, ущільнення

виконувалося протягом 200 обертів для кожного зразка.

Фізико-механічні властивості ущільнених зразків ЩМА-15 та ЩМА-20 з різними видами бітумів представлені в таблицях 3 та 4. Всі склади в'язкого компонента для ЩМАС-15 та ЩМАС-20 відповідали вимогам до показника стікання в'язкого компонента, який не перевищує 0,20% за масою, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-127:2015. Вимоги до фізико-технічних показників ЩМА-15 та ЩМА-20, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-127:2015, встановлені для кліматичного району А-2, який включає в себе Львівську область.

Таблиця 3 – Фізико-механічні властивості ЩМА-15

Показник	ЩМА-15							ЩМА-15 та ЩМА-20 згідно ДСТУ Б В.2.7-127:2015
	БО2	БОМА-160 (БО2 + 2 % мас. МА)	БОМА/ПЕГ-400-160 (БО2 + 2 % мас. МА + 2 % мас. ПЕГ-400)	БОМА/ПЕГ-2000-160 (БО2 + 2 % мас. МА + 2 % мас. ПЕГ-2000)	ГМА-160 (Г1 + 2 % мас. МА)	ГМА/ПЕГ-400-160 (Г1 + 2 % мас. МА + 2 % мас. ПЕГ-400)	ГМА/ПЕГ-2000-160 (Г1 + 2 % мас. МА + 2 % мас. ПЕГ-2000)	
Середня густина, г/см ³	2,4 1	2,47	2,48	2,49	2,46	2,46	2,48	–
Водонасичення, % об.	1,5	2,6	1,3	0,9	0,9	1,4	1,6	1,0 - 3,0
Границя міцності при стиску (МПа) за температури :								
20 °С	2,7	2,8	2,5	2,4	2,1	2,6	2,5	≥ 2,1
50 °С	1,7	1,3	1,7	1,2	0,7	0,6	0,7	≥ 0,6

Таблиця 4 – Фізико-механічні властивості ЦЦМА-20

Показник	ЦЦМА-20					ЦЦМА-15 та ЦЦМА-20 згідно ДСТУ Б В.2.7-127:2015
	БО4	БО4 + 2 % мас. МА (180 °С; 1 год)	БО4 + 2 % мас. ПЕГ-2000 (180 °С; 3 год)	БО4 + 2 % мас. Саlprene 501 М (SBS) (180 °С; 3 год)	БО4 + 2 % мас. Саlprene 501 М (SBS) (180 °С; 3 год)	
Середня густина, г/см ³	2,3 9	2,3 9	2,45	2,41	2,4 3	–
Водонасичення, % об.	3,3	3,9	1,7	2,8	2,3	1,0 -3,0
Границя міцності при стиску (МПа) за температури:						
20 °С	4,4	4,0	3,5	3,7	4,3	≥ 2,1
50 °С	0,8	1,0	0,8	0,6	0,9	≥ 0,6

Аналіз таблиць 3 та 4 показує, що більшість ЦЦМА-15 та ЦЦМА-20, виготовлених з використанням розглянутих в'язучих матеріалів, відповідають вимогам, встановленим ДСТУ Б В.2.7-127:2015.

При отриманні в'язучих матеріалів із гудрону (Г1), модифікованого послідовно МА та ПЕГ-400 чи ПЕГ-2000, були одержані ЦЦМА-15, які мають нижчі показники міцності, особливо при температурі 50 °С, у порівнянні з в'язучими матеріалами, отриманими шляхом модифікації окисненого бітуму (БО2).

Також було проведено порівняння ЦЦМА-20, отриманих з використанням бітумів, модифікованих SBS, та досліджуваних в'язучих матеріалів. ЦЦМА-20, виготовлені з використанням досліджуваних в'язучих матеріалів (окисненого бітуму, модифікованого МА, та малеїнізованого окисненого бітуму, модифікованого ПЕГ-2000), відрізняються меншим водонасиченням та міцністю при 20 та 50 °С, порівняно з використанням окисненого бітуму, модифікованого SBS.

Для підтвердження цих результатів, було проведено дослідження відшарування в'язучого матеріалу під впливом води від традиційних кислих наповнювачів (Щ1) за методом RBT. Випробування RBT були проведені згідно з ДСТУ EN 12697-11:2018 і тривали 6, 12, 24, 48 та 78 годин. Результати цих випробувань представлені на рис. 1.

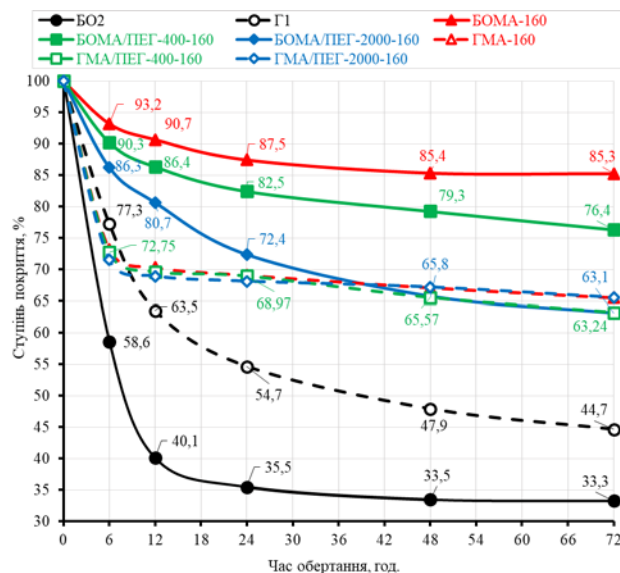


Рис. 1. – Результати тестів на відокремлення бітуму від кам'яного щебеню (фіксувалися за допомогою методу RBT).

З аналізу рисунку 1 випливають нижченаведені висновки. Окиснений бітум (БО2) проявляє найнижчу стійкість до відшарування від традиційних кислих наповнювачів асфальтобетону під дією води, тоді як модифікований окиснений бітум МА за 160 °С (БОМА-160) виявляє виняткову стійкість до відшарування. Трохи гіршою стійкістю до відшарування володіють зразки БОМА/ПЕГ-400-160 та БОМА/ПЕГ-2000-160, що, на нашу думку, може бути пов'язано з високою розчинністю ПЕГ-400 та ПЕГ-2000 у воді, і вони, імовірно, не вступають в хімічну реакцію естерифікації. Для отримання бітумного матеріалу з кращою адгезією до кислих мінеральних матеріалів, рекомендується використовувати малеїнізовані бітуми, модифіковані ПЕГ з меншою молекулярною масою (ПЕГ-400).

Також варто відзначити, що БОМА та ГМА проявляють відмінну поведінку під час випробування на відшарування. Протягом перших 6 годин тесту зразки, отримані з використанням гудрону (ГМА-160, ГМА/ПЕГ-400-160 та ГМА/ПЕГ-2000-160), значно відшаровуються від кислих мінеральних матеріалів, але після 6 годин відшарування практично припиняється. При використанні окисненого бітуму (БО2) як сировини для процесу модифікації, такого аномального збору не спостерігається.

Висновки. Встановлено, що при одержанні в'язучих матеріалів із гудрону (Г1) внаслідок

модифікування його послідовно малеїновим ангідридом та поліетиленгліколем (ПЕГ-400 чи ПЕГ-2000) одержано щелево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА-15) із нижчими показниками міцності, особливо за 50 °С, у порівнянні із в'язкими матеріалами отриманими модифікуванням окисненого бітуму (БО2).

Порівняння ЩМА-20 одержаних із використанням бітумів, модифікованих стирен-бутадієн-стиреном та досліджуваних в'язких показало, що використання досліджуваних в'язких матеріалів (окисненого бітуму, модифікованого малеїновим ангідридом та малеїнізованого окисненого бітуму, модифікованого ПЕГ-2000) характеризуються меншим водонасиченням та міцністю за 20 та 50 °С у порівнянні із використанням окисненого бітуму модифікованого стирен-бутадієн-стиреном.

Список літератури

- Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., & Oliviero Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Appl. Sci.* 2019. №9(4). P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.
- Zhu J. Birgisson B. and Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *Eur. Polym. J.* 2014. №54. P. 18-38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
- Nykypanchuk M., Hrynchuk Y., and Olchovyk M. Effect of Modified Bitumen on Physico-mechanical Properties of Asphalt Concrete. *Chem. Chem. Technol.* 2013. №7 (4). P. 467-470. <https://doi.org/10.23939/chcht07.04.467>.
- Li M., Zhang M., Rong H., Zhang X., He L., Han P., Tong M. Transport and deposition of plastic particles in porous media during seawater intrusion and groundwater-seawater displacement processes. *Sci. Total Environ.* 2021. №781. P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146752>.
- Nizamuddin S., Boom Y. J., Giustozzi F. Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review. *Polymers.* 2021. №13(19). P. 1-51. <https://doi.org/10.3390/polym13193242>.
- Peng C., Chen P., You Z., Lv S., Zhang R., Xu F., ... & Chen H. Effect of silane coupling agent on improving the adhesive properties between asphalt binder and aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2018. №169. P. 591-600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.186>.
- Cuadri A. A., Partal P., Navarro F. J., García-Morales M., & Gallegos C. Bitumen chemical modification by thiourea dioxide. *Fuel.* 2011. №90(6). P. 2294-2300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.035>.
- Ortega F. J., Navarro F. J., & García-Morales M. Dodecylbenzenesulfonic acid as a Bitumen modifier: A novel approach to enhance rheological properties of bitumen. *Energy Fuels.* 2017. №31(5). P. 5003-5010. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00419>.
- Kang Y., Wang F., & Chen Z. Reaction of asphalt and maleic anhydride: Kinetics and mechanism *J. Chem. Eng.* 2010. №164(1). P.230-237. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2010.08.020>.
- Geckil T., Seloglu M. Performance Properties Of Asphalt Modified With Reactive Terpolymer. *Constr Build Mater.*

2018. №173. P. 262-271.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036>

- Ivashkiv O., Astakhova O., Shyshchak O., Plonska-Brzezinska M., Bratychak M. Structure And Application of ED-20 Epoxy Resin Hydroxy-Containing Derivatives in Bitumen-Polymeric Blends. *Chem. Chem. Technol.* 2015. №9(1). P. 69-76. <https://doi.org/10.23939/chcht09.01.069>.
- Çubuk M., Gürü M., Çubuk M. K., Arslan D. Rheological Properties and Performance Evaluation of Phenol Formaldehyde Modified Bitumen. *J. Mater. Civ. Eng.* 2014. №26(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000889](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000889).
- Zhang H., Su C., Bu X., Zhang Y., Gao Y., Huang M. Laboratory investigation on the properties of polyurethane/unsaturated polyester resin modified bituminous mixture. *Constr. Build. Mater.* 2020. №260. P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119865>.
- Gunka V., Hrynchuk Y., Sidun I., Demchuk Y., Prysiaznyi, Y., & Bratychak M. Production of Bitumen Modified with Low-Molecular Organic Compounds from Petroleum Residues. 6. Temperature Effect on the Chemical Modification of Bitumen with Maleic Anhydride. *Chem. Chem. Technol.* 2022. №16. P. 475-483. <https://doi.org/10.23939/chcht16.03.475>.

References (transliterated)

- Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., & Oliviero Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Appl. Sci.* 2019. №9(4). P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.
- Zhu J. Birgisson B. and Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *Eur. Polym. J.* 2014. №54. P. 18-38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
- Nykypanchuk M., Hrynchuk Y., and Olchovyk M. Effect of Modified Bitumen on Physico-mechanical Properties of Asphalt Concrete. *Chem. Chem. Technol.* 2013. №7 (4). P. 467-470. <https://doi.org/10.23939/chcht07.04.467>.
- Li M., Zhang M., Rong H., Zhang X., He L., Han P., Tong M. Transport and deposition of plastic particles in porous media during seawater intrusion and groundwater-seawater displacement processes. *Sci. Total Environ.* 2021. №781. P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146752>.
- Nizamuddin S., Boom Y. J., Giustozzi F. Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review. *Polymers.* 2021. №13(19). P. 1-51. <https://doi.org/10.3390/polym13193242>.
- Peng C., Chen P., You Z., Lv S., Zhang R., Xu F., ... & Chen H. Effect of silane coupling agent on improving the adhesive properties between asphalt binder and aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2018. №169. P. 591-600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.186>.
- Cuadri A. A., Partal P., Navarro F. J., García-Morales M., & Gallegos C. Bitumen chemical modification by thiourea dioxide. *Fuel.* 2011. №90(6). P. 2294-2300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.035>.
- Ortega F. J., Navarro F. J., & García-Morales M. Dodecylbenzenesulfonic acid as a Bitumen modifier: A novel approach to enhance rheological properties of bitumen. *Energy Fuels.* 2017. №31(5). P. 5003-5010. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00419>.
- Kang Y., Wang F., & Chen Z. Reaction of asphalt and maleic anhydride: Kinetics and mechanism *J. Chem. Eng.*

2010. №164(1). P.230-237.
<https://doi.org/10.1016/j.ccej.2010.08.020>
10. Geckil T., Seloglu M. Performance Properties Of Asphalt Modified With Reactive Terpolymer. *Constr. Build. Mater.* 2018. №173. P. 262-271.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036>
 11. Ivashkiv O., Astakhova O., Shyshchak O., Plonska-Brzezinska M., Bratychak M. Structure And Application of ED-20 Epoxy Resin Hydroxy-Containing Derivatives in Bitumen-Polymeric Blends. *Chem. Chem. Technol.* 2015. №9(1). P. 69-76. <https://doi.org/10.23939/chcht09.01.069>
 12. Çubuk M., Gürü M., Çubuk M. K., Arslan D. Rheological Properties and Performance Evaluation of Phenol Formaldehyde Modified Bitumen. *J. Mater. Civ. Eng.* 2014. №26(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000889](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000889)
 13. Zhang H., Su C., Bu X., Zhang Y., Gao Y., Huang M. Laboratory investigation on the properties of polyurethane/unsaturated polyester resin modified bituminous mixture. *Constr. Build. Mater.* 2020. №260. P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119865>
 14. Gunka V., Hrynychuk Y., Sidun I., Demchuk Y., Prysiazhnyi, Y., & Bratychak M. Production of Bitumen Modified with Low-Molecular Organic Compounds from Petroleum Residues. 6. Temperature Effect on the Chemical Modification of Bitumen with Maleic Anhydride. *Chem. Chem. Technol.* 2022. №16. P. 475-483. <https://doi.org/10.23939/chcht16.03.475>

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гунька Володимир Мирославович (Volodymyr Gunka) – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри хімічної технології переробки нафти та газу; м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0002-3480-0693; e-mail: volodymyr.m.hunka@lpnu.ua.

Гринчук Юрій Миколайович (Yurii Hrynychuk) – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри фізичної, аналітичної та загальної хімії; м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-9023-5900; e-mail: yurii.m.hrynychuk@lpnu.ua.

Присяжний Юрій Володимирович (Yuriy Prysiazhnyi) – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри хімічної технології переробки нафти та газу; м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0003-1881-7900; e-mail: yurii.v.prysiashnyi@lpnu.ua.

Сідун Юрій Володимирович (Iurii Sidun) – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри автомобільних доріг та мостів; м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0003-3606-6899; e-mail: yurii.v.sidun@lpnu.ua.

Демчук Юрій Ярославович (Yuriy Demchuk) – доктор філософії, Національний університет «Львівська політехніка», асистент кафедри хімічної технології переробки нафти та газу; м. Львів, Україна; Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, асистент кафедри загальної, біонеорганічної, фізикоїдної хімії; м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-7983-5067; e-mail: yuriy_demchuk@ukr.net.

Волинець Марина Юрївна (Maryna Volynets) – Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, студентка кафедри загальної, біонеорганічної, фізикоїдної хімії; м. Львів, Україна; e-mail: maryna.volynets@ukr.net.

Надійшла (received) 30.09.2023