

УДК 625.855:691.6

АСФАЛЬТОБЕТОННІ СУМІШІ З ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИМИ ДОБАВКАМИ НА ОСНОВІ ПАР

Кандидати техн. наук Ю. В. Сідун, С. А. Чугуєнко, В. П. Корюк,
асп. Д. О. Куліков, магістр Н. Р. Тешишин

ASPHALT CONCRETE MIXTURES WITH ENERGY-SAVING SURFACTANT-BASED ADDITIVES

PhD (Tech.) Yu. Sidun, PhD (Tech.) S. Chuguyenko, PhD (Tech.) V. Koriuk,
postgraduate student D. Kulikov, master N. Teshchshyn

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358829>



Анотація. У статті розглянуто вплив енергозберігаючої добавки на основі поверхнево-активних речовин, введеної в бітум БНД 70/100, на щільний дрібнозернистий асфальтобетон типу А марки 1 (АСГ.ДР.Щ.А.НП.І) із найбільшим розміром зерна кам'яного матеріалу 20 мм. Для цього ущільнення асфальтобетонних сумішей відбувалося за рахунок використання гіраторного ущільнювача за температур 150 °С, 130 °С і 110 °С. Встановлено, що енергозберігаюча добавка на основі ПАР ЕН 3 дає змогу виготовляти АСГ.ДР.Щ.А.НП.І за знижених технологічних температур ущільнення з покращеними фізико-механічними показниками, особливо міцнісними.

Ключові слова: бітум нафтовий дорожній, модифікація, енергозберігаюча добавка, асфальтобетонна суміш, ущільнення.

Abstract. The article investigates the influence of an energy-saving additive based on surface-active substances (surfactants) introduced into BND 70/100 bitumen on the properties of dense fine-grained asphalt concrete Type A, Grade 1 with a maximum aggregate size of 20 mm. A domestically produced oxidized petroleum road bitumen BND 70/100 manufactured by PJSC «Ukratnafta» (Kremenchuk, Ukraine) was selected as the model bitumen for experimental studies. The determination of the main and additional physical and mechanical characteristics of the bitumen was carried out in accordance with the requirements of DSTU 4044:2019. Compaction of asphalt concrete mixtures was performed using a gyratory compactor at different technological temperatures, namely 150 °C, 130 °C, and 110 °C. Both unmodified mixtures and mixtures modified with the energy-saving surfactant-based additive EN3 were compacted to achieve the specified specimen height and target air void content, while the number of gyrations was not fixed. This approach made it possible to assess the compaction efficiency and structural formation of the asphalt concrete under varying temperature conditions. The obtained results indicate a general decrease in strength characteristics of asphalt concrete mixtures with a reduction in compaction temperature. However, the introduction of the energy-saving additive based on surfactants EN 3 significantly improves the performance properties of asphalt concrete, especially at reduced compaction temperatures. In particular, the use of the additive contributes to an increase in compressive strength at temperatures of 20 °C and 50 °C and a reduction in the water saturation index at the lowest investigated compaction temperature of 110 °C. It was established that at a compaction temperature

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Сідун Ю. В., Чугуєнко С. А., Корюк В. П., Куліков Д. О., Тешишин Н. Р., 2026.

of 150 °C, the application of the EN 3 additive reduces the water saturation by volume of asphalt concrete specimens by approximately 15 %, while at a compaction temperature of 110 °C this reduction reaches up to 22 %. At the same time, the compressive strength at 20 °C increases on average by about 5 %, whereas the compressive strength at 50 °C increases by up to 22 % over the entire investigated temperature range. In general, the research confirms that the energy-saving surfactant-based additive EN 3 enables the production of dense fine-grained asphalt concrete at reduced technological compaction temperatures while ensuring improved physical and mechanical properties, particularly strength characteristics. pavements.

Keywords: petroleum road bitumen, modification, energy-saving additive, asphalt concrete mixture, compaction.

Вступ. Радикальне підвищення якості бітумів полягає у використанні модифікованих бітумних в'язучих. Це в'язучі, структура і (або) фізико-механічні властивості яких змінені введенням модифікатора. Найпоширенішим варіантом отримання асфальтобетону з покращеними властивостями є модифікація самого бітуму. Завдяки застосуванню модифікованих бітумів підвищено міцнісні характеристики, теплостійкість, водостійкість і тріщиностійкість асфальтобетонних покриттів, суттєво збільшується строк до капітального ремонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед великого спектра добавок для модифікації бітумів і асфальтобетонів виділяють енергозберігаючі добавки – це добавки, вироблені на основі восків, поверхнево-активних речовин (ПАР) та/або інших складових, що дають змогу знизити технологічні температури виробництва, укладання та ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей, а також виконувати роботи за низьких температур навколишнього середовища. Щоб класифікувати добавку як енергозберігаючу, вона має знижувати наведені температури не менш ніж на 15 °C. Із цими добавками можна економити енергоресурси разом із зменшенням викидів шкідливих речовин у довкілля. Зменшення температур вироблення та улаштування асфальтобетонних сумішей з енергозберігаючими добавками буде залежати від виду (типу) добавки, в'язкості

вихідного в'язучого, складу самої суміші, температури навколишнього середовища. Енергозберігаючі добавки є інгібіторами теплового технологічного старіння бітуму, адже внаслідок впливу високих температур відбуваються зміни в груповому хімічному складі бітуму на етапі виготовлення і довгострокової експлуатації.

Добавки енергозберігаючі на основі ПАР є водночас ефективними адгезійними добавками для бітумів і асфальтобетонів. В умовах сучасного ринку виробники пропонують окремі добавки на основі ПАР, що поєднують енергозберігаючі та адгезійні властивості. Одними з таких добавок є Rediset LQ шведської компанії Nouryon і Evotherm M1 компанії Ingevity (США). Ці добавки є рідинами бурштинового кольору, їх дозування в бітум є незначним: Rediset LQ від 0,3 до 1 % мас. від маси бітуму, Evotherm M1 від 0,3 до 0,5 % мас. від маси бітуму. Дозування залежить від виду використаного асфальтобетону і температур його виготовлення та укладання, часу його перевезення, необхідного ступеня його ущільнення, марки в'язучого в асфальтобетоні та використання в його складі регенованого асфальто-бетонного матеріалу (асфальтогранулята). Rediset LQ – добавка, що надає бітумному в'язучому активну адгезію відносно мінеральних матеріалів і забезпечує підвищення водостійкості асфальтобетону, що зменшує утворення на покриттях викришувань, вибоїн і ям, уповільнює процеси старіння бітумів. Додаючи її, можна зменшити вміст бітуму в асфальтобетонній суміші та знизити

технологічні температури виробництва, ущільнення, укладання асфальтобетонних сумішей до 40 °С. Evotherm M1 являє собою набір ПАР, які знижують внутрішнє тертя в тонких плівках бітуму на межі в'язучого з мінеральною частиною, його дія в асфальтобетоні є аналогічною Rediset LQ. Із цими добавками можна додавати в

асфальтобетонну суміш до 50 % асфальтогрануляту [1-16]. Каталог сучасних матеріалів для будівництва, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг [17] наводить певні енергозберігаючі добавки на основі ПАР, що застосовують в Україні (табл. 1).

Таблиця 1

Енергозберігаючі добавки на основі ПАР, що застосовують в Україні [17]

Марка	Характеристика	Призначення	Вміст у бітумі, %	Температура модифікації, °С	Виробник
Evotherm M1	Рідина від бурштинового до коричневого кольору	Зниження температури на 20–40 °С. Ущільнення за температури 60–50 °С. Підвищує зчеплення, водостійкість. Можливість додавання до 45 % асфальтобетонної крихти (RAP)	0,3 – 0,5	100 – 180	Ingevity (США)
iWarm-T	В'язка рідина коричневого кольору	Зниження технологічних температур до 40–50 °С. Підвищення в'язкості і температури розм'якшення бітумів	0,3 – 0,5	110 – 190	ТОВ «АЙПІТІ ХІМ» / ТОВ «АЙПІТІ ТРЕЙДІНГ» (Україна)
LowTherm 4G	Рідина бурштинового кольору	Підвищення зчеплюваності та водостійкості. Уповільнення старіння бітумів. Зниження температури виробництва та ущільнення до 50 °С	0,2 – 0,6	100 – 170	ACTIVA S.r.l. (Італія)
Rediset LQ	Рідина бурштинового кольору	Підвищення зчеплюваності та водостійкості. Уповільнення старіння. Зниження технологічних температур до 40 °С. Використання для гарячих сумішей	0,3 – 1,0	115 – 190	Nouryon (Нідерланди)

Отже, для виробництва асфальтобетонних сумішей бітум із нагріванням виділяє в атмосферу шкідливі леткі речовини. Чим температура виготовлення вища, тим більше таких речовин потрапляє в навколишнє середовище, тому технологічно потрібно дотримуватися певних температурних режимів і шукати можливості їх зниження.

Також, виходячи з економічної точки зору, виробництво так званих теплих асфальтобетонних сумішей призводить до зниження енерговитрат, що стає економічно обґрунтованим.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є встановити ефект від використання енергозберігаючих добавок на основі ПАР для асфальтобетону.

Основним завданням дослідження є випробувати асфальтобетони, модифіковані енергозберігаючими добавками на основі ПАР, і встановити зміну фізико-механічних властивостей асфальтобетонів за модифікації.

Основна частина дослідження. Як модельний бітум для проведення

випробувань було вибрано вітчизняний бітум нафтовий дорожній окиснений марки БНД 70/100, виробник – ПАТ «Укртатнафта» (м. Кременчук, Україна). Основні та додаткові фізико-механічні показники бітуму БНД 70/100, виробник – ПАТ «Укртатнафта», відповідно до ДСТУ 4044:2019 [18] наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Показники бітуму марки БНД 70/100, виробник ПАТ «Укртатнафта»

Номер з/п	Показник	Фактичне значення	Вимоги щодо бітуму БНД 70/100, за ДСТУ 4044:2019 [18]
Основні показники			
1	Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм	75	71-100
2	Температура розм'якшеності, °С	48,8	45-51
3	Температура крихкості, за Фраасом, °С	-13	≤-13
4	Розтяжність (дуктильність) за температури 25 °С, см	>150	≥60
5	Зчеплюваність із поверхнею скла, %	31,2	≥18
6	Температура спалаху у відкритому тиглі, °С	295	≥ 230
7	Розчинність в органічному розчиннику, %	99,96	≥99,0
8	Індекс пенетрації	-0,50	від -2,0 до 1,0

Згідно з попередніми дослідженнями [19] для випробувань було вибрано найефективнішу за адгезійними властивостями енергозберігаючу добавку на основі ПАР (ЕН 3) у дозуванні 0,5 % мас. до бітуму. Сировинні мінеральні матеріали підбирали для виготовлення асфальтобетонної суміші умовного позначення АСГ.ДР.Щ.А.НП.І (з

найбільшим розміром зерна кам'яного матеріалу 20 мм). Як заповнювачі використали гранітний щебінь фракцій 5-10, 10-15 і 15-20 мм, щебеневий відсів 0-5 мм, наповнювач з осадових карбонатних гірських порід. Склад мінеральної частини асфальтобетонної суміші підбирали для АСГ.ДР.Щ.А.НП.І за ДСТУ Б В.2.7-119:2011 (Зміна № 1) [20] (рисунок).

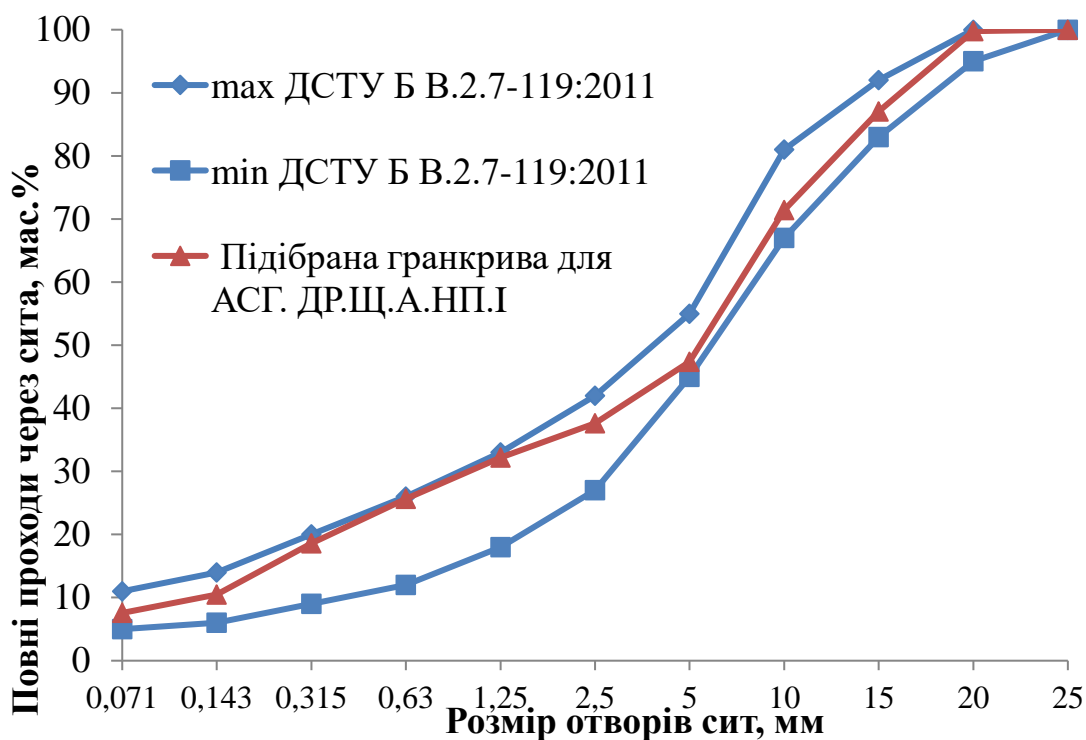


Рис. Підібраний склад мінеральної частини суміші АСГ.ДР.Щ.А.НП.І

Гранулометричний склад АСГ.ДР.Щ.А.НП.І у межах фракції 0,315-1,25 мм умисно наблизили до кривої «max» за ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Зміна № 1 [20] для проектування більш жорсткого каркаса суміші. Фактичний підібраний склад

АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із модифікованим бітумним в'язучим наведений у табл. 3.

Ущільнення АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із ЕНЗ проводили за трьох різних температурних режимів (табл. 4).

Таблиця 3

Фактичний склад АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із модифікованим бітумним в'язучим

Назва матеріалу	Вміст матеріалу в асфальтобетоні, % мас.	
Щебінь фракції 15-20 мм	12,00	11,4
Щебінь фракції 10-15 мм	15,00	14,2
Щебінь фракції 5-10 мм	25,00	23,7
Щебенекий відсів 0-5 мм	43,00	40,8
Наповнювач з осадових карбонатних гірських порід	5,0	4,8
Сумарна кількість	100,0	94,9
Модифіковане бітумне в'язуче добавкою ЕН 3	понад масу мінеральних складових 5,4	у масі мінеральних складових 5,1

Температурні режими виготовлення та ущільнення АСГ.ДР.Щ.А.НП.І

Но- мер з/п	В'язуче	Модифі- катор	Температура, °С			
			Складових АСГ.ДР.Щ.А.НП.І		АСГ.ДР.Щ.А.НП.І	
			бітумного в'язучого	щебенивих матеріалів	змішування	ущільнення
1	БНД 70/100, ПАТ «Укртатн афта»	-	150	180	165	150
2						
3		ЕНЗ				130
4						

Ущільнення асфальтобетонних сумішей відбувалося за рахунок використання гіраторного ущільнювача Gyrotory Compactor GYROCOMP компанії CONTROLS (Італія) [21]. Масу суміші, що необхідно додати у форму, визначали за методикою [22] з емпіричною поправкою на тип використаного гіраторного ущільнювача. Для гіраторного ущільнювача є декілька параметрів, що задають для ущільнення (їх можна встановлювати за системою SHRP SUPERPAVE):

- кут нахилу осі зразка 0,82°;
- навантаження на зразок 600 кПа;
- кількість гірацій (обертів) залежно від навантаження ESAL за SHRP SuperPave [22].

У роботі розглянуто варіант ущільнення зразків: кількість гірацій не була фіксованою, а її підбирали для отримання висоти зразка 100 мм і середнього значення залишкової пористості асфальтобетону типу А (у межах від 2,5 до 3,3 %) для кліматичних районів А-1; А-2 [20]. Для цього визначали дійсну густину асфальтобетонної суміші пікнометричним методом, після цього розраховували необхідну масу суміші для зразка, ущільнювали до висоти зразка 100 мм і фіксували кількість прикладених гірацій. Ідеєю цього варіанта ущільнення було отримати таку середню густину асфальтобетону (із заданою висотою зразка 100 мм), яка б забезпечувала залишкову пористість асфальтобетону в окреслених межах.

Спершу провели дослідження щодо ущільнення немодифікованих і модифікованих АСГ.ДР.Щ.А.НП.І для досягнення заданої висоти зразка та показника залишкової пористості з нефіксованою кількістю гірацій (табл. 5). Безпосередньо вплив ЕНЗ за різних температур на ущільнення АСГ.ДР.Щ.А.НП.І наведено в табл. 6.

Порівнюючи табл. 5 і 6, можна дійти висновку, що з модифікуванням бітуму добавкою ЕН 3 для АСГ.ДР.Щ.А.НП.І вдалося дещо знизити кількість гірацій для ущільнення за температур 130 та 110 °С за майже однакових показників залишкової пористості. За температури 150 °С для ущільнення зразків на немодифікованому в'язучому знадобилося 30 гірацій, а на модифікованому 32, при цьому необхідно звернути увагу на показники водонасичення та залишкової пористості. Так, для асфальтобетону на модифікованому в'язучому ці показники на 15-20 % менше, що свідчить про скоріш однакове ущільнення за однакової кількості прикладання ущільнюючого навантаження. Схоже можна спостерігати для ущільнення за температури 110 °С, кількість гірацій 41 та 40 для немодифікованого та модифікованого в'язучих, але показник водонасичення для асфальтобетону на модифікованому в'язучому дещо менший. Різницю в кількості гірацій для ущільнення

асфальтобетонів можна вважати невеликою, але в подальшій роботі слід дослідити можливість зміни технологічних

температур приготування асфальтобетонних сумішей, що за позитивних результатів дасть економічний ефект.

Таблиця 5

Характеристики ущільнення немодифікованої АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із БНД 70/100 ПАТ «Укртатнафта»

Показник	Значення показників за температури ущільнення								
	150 °С			130 °С			110 °С		
Дійсна густина, г/см ³	2,456 (2,46)								
Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість гірацій	32	28	30	35	36	30	41	42	39
Середня кількість гірацій	30			34			41		
Середня густина зразка (ів), г/см ³	2,378	2,375	2,374	2,381	2,378	2,375	2,39	2,385	2,377
	2,376			2,378			2,384		
Залишкова пористість, % за об'ємом	3,2	3,3	3,4	3,1	3,2	3,3	2,7	2,9	3,2
Середній показник залишкової пористості, % за об'ємом	3,30			3,20			2,93		
Водонасичення, % за об'ємом	2	2	2,1	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8
Середній показник водонасичення, % за об'ємом	2,03			1,77			1,80		

Таблиця 6

Характеристики ущільнення АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із ЕН 3

Показник	Значення показників за температури ущільнення								
	150 °С			130 °С			110 °С		
Дійсна густина, г/см ³	2,454 (2,45)								
Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість гірацій	31	31	33	30	32	33	39	40	41
Середня кількість гірацій	32			32			40		
Середня густина зразка (ів), г/см ³	2,377	2,378	2,382	2,373	2,38	2,379	2,376	2,376	2,386
	2,379			2,377			2,379		
Залишкова пористість, % за об'ємом	3,2	3,1	2,9	3,3	3	3,1	3,2	3,2	2,8
Середній показник залишкової пористості, % за об'ємом	3,07			3,13			3,07		
Водонасичення, % за об'ємом	2	1,7	1,5	2	1,6	1,6	1,8	1,5	1,2
Середній показник водонасичення, % за об'ємом	1,73			1,73			1,50		

Крім фізичних властивостей асфальтобетонів розглянемо механічні властивості, а саме міцність для стискання за температур 20 та 50 °С. Міцнісні характеристики АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із ЕН 3 наведено в табл. 7.

Аналіз табл. 7 вказує на те, що міцнісні характеристики модельної АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із немодифікованим бітумом ПАТ «Укртатнафта» із зменшенням

температури ущільнення зменшуються. Але використання ЕН 3 дає змогу збільшити міцнісні показники, особливо за температури 110 °С. Загалом використання енергозберігаючої добавки на основі ПАР ЕН 3 дає змогу виготовляти АСГ.ДР.Щ.А.НП.І за знижених технологічних температур ущільнення із покращеними фізико-механічними показниками, особливо міцнісними.

Таблиця 7

Границі міцності для стискання за температури 20 і 50 °С

АСГ.ДР.Щ.А.НП.І із БНД 70/100	Границі міцності для стискання за температури (середнє значення)	
	20 °С	50 °С
Температура ущільнення суміші 150 °С		
без добавки	3,8	1,1
із ЕН 3	4,0	1,3
Температура ущільнення суміші 130 °С		
без добавки	3,7	1,0
із ЕН 3	3,9	1,1
Температура ущільнення суміші 110 °С		
без добавки	3,4	0,9
із ЕН 3	3,6	1,1

Висновки. Енергозберігаючі добавки є поширеним способом продовження строків виконання робіт із використанням асфальтобетонних сумішей. На ринку України є багато таких добавок, але дослідження їхнього впливу на властивості асфальтобетонів достатньо не вивчені. Використання енергозберігаючої добавки на основі ПАР ЕН 3 дає змогу за температури ущільнення 150 °С знизити показник водонасичення асфальтобетонних зразків за об'ємом на 17 %, а за температури ущільнення 110 °С на 20 %, збільшити за досліджених температур границю міцності для стискання за температури 20 °С у середньому на 5 %, а за 50 °С – до 22 %.

Використання енергозберігаючої добавки дало змогу в лабораторних умовах незначно знизити час прикладення ущільнюючого навантаження для досягнення завданих розмірів зразків. Енергозберігаючі добавки допомагають знизити технологічні температури ущільнення асфальтобетонних сумішей і технологічні температури приготування асфальтобетонних сумішей. У зв'язку з цим у подальших роботах заплановано дослідження впливу технологічних температур приготування асфальтобетонних сумішей з енергозберігаючими добавками на фізико-механічні властивості асфальтобетонів.

Список використаних джерел

1. Chariwala A., Patel S., Shaikh M., Tailor S. A. (2016). A study on warm mix asphalt technology on bituminous mixes using Rediset-Wmx. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, No. 13(4). Pp. 15–25. DOI: 10.9790/1684-1304061525
2. Wu S., Zhang W., Shen S., Li X., Muhunthan B., Mohammad L. N. (2017). Field-aged asphalt binder performance evaluation for Evotherm warm mix asphalt: comparisons with hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. No. 156. Pp. 574–583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.028.
3. Milad A., Babalghaith A. M., Al-Sabaei A. M., Dulaimi A., Ali A., Reddy S. S., Bilema M., Yusoff N. I. M. (2022). A comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: towards a sustainable asphalt pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, No. 19. Art. 14863. DOI: 10.3390/ijerph191914863.
4. Caputo P., Abe A. A., Loise V., Porto M., Calandra P., Angelico R., Oliviero Rossi C. (2020). The role of additives in warm mix asphalt technology: an insight into their mechanisms of improving an emerging technology. *Nanomaterials*, No. (10)6. Art. 1202. DOI: 10.3390/nano10061202.
5. Rahman M. A., Ghabchi R., Zaman M., Ali S. A. (2021). Rutting and moisture-induced damage potential of foamed warm mix asphalt (WMA) containing RAP. *Innovative Infrastructure Solutions*, No. 6. Pp. 1–11. DOI: 10.1007/s41062-021-00528-7.
6. Pérez-Martínez M., Moreno-Navarro F., Martín-Marín J., Ríos-Losada C., Rubio-Gómez M. C. (2014). Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction. *Journal of Cleaner Production* No. 65. Pp. 374–379. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.09.012.
7. Ai C., Li Q. J., Qiu Y. (2015). Testing and assessing the performance of a new warm mix asphalt with SMC. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, No. 2. Pp. 399–405. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.10.002.
8. Ma H., Zhang Z., Zhao X., Wu S. (2019). A comparative life cycle assessment (LCA) of warm mix asphalt (WMA) and hot mix asphalt (HMA) pavement: a case study in China. *Advances in Civil Engineering*, No. 2019. Art. 9391857. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/9391857/>.
9. Mudrychenko A., Savenko V., Illiash S., Honcharenko V. (2024). Determination of the weight of factors affecting the physical and mechanical characteristics of warm asphalt concrete mixtures. *World Science*, No. 1(83). DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30032024/8116.
10. Capitão S. D., Picado-Santos L. G., Martinho F. (2012). Pavement engineering materials: review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*. No. 36. Pp. 1016–1024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038.
11. Cheraghian G., Falchetto A. C., You Z., Chen S., Kim Y. S., Westerhoff J., Ki H. M., Wistuba M. P. (2020). Warm mix asphalt technology: an up-to-date review. *Journal of Cleaner Production*, No. 268. Art. 122128. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122128.
12. Савенко В. Я., Мудриченко А. Я., Ілляш С. І., Гончаренко В. В. (2024). Оптимізація температури приготування, вмісту енергозберігаючої добавки та асфальтобетонної крихти під час виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей. *Дороги і мости*, Вип. 29. С. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.093>
13. Савенко В. Я., Мудриченко А. Я. (2023). Дослідження стійкості до утворення колії теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з використанням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму з додаванням регенованого асфальтобетону. *Дороги і мости*, Вип. 27. С. 121–129. DOI: 10.36100/dorogimosti2023.27.121.

14. Савенко В. Я., Мудриченко А. Я., Стасюк Т. О. (2023). Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування теплих асфальтобетонних сумішей для улаштування шарів дорожнього одягу. Вісник НТУ, Вип. 55. С. 240–246. DOI: 10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246.

15. Мудриченко А. Я., Савенко В. Я. (2018). Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використання теплих сумішей. Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Київ: НТУ, Вип. 103. С. 075–083. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/75.pdf.

16. Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколов О. В. (2017). Використання енергозберігаючих добавок для зниження технологічних температур приготування асфальтобетонних сумішей. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 99. С. 49 – 57.

17. Каталог сучасних матеріалів для будівництва, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг. ДП «НІРІ» Київ, 2020.

18. ДСТУ 4044:2019. Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови. Чинний від 2020-05-01. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=84291.

19. Sidun, I., Chuguyenko, S., Koryuk, V., Baranovych, Y. & Teshchyshyn, N. (2025). Physical and mechanical properties of bitumen modified with energy-saving additives based on surface-active substances. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, No. 2(65). Pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2025.65.4179>.

20. ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Зміна № 1.

21. ДСТУ EN 12697-31:2021. Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Ч. 31. Підготування зразка гіраторним ущільнювачем (EN 12697-31:2019, IDT).

22. Selection of the composition of the Superpave mixture. Asphalt Institute Superpave Series, No. 2 (SP-2) Third Edition (2001).

References

1. Chariwala, A., Patel, S., Shaikh, M., Tailor, S. A. (2016). A study on warm mix asphalt technology on bituminous mixes using Rediset-Wmx. Journal of Mechanical and Civil Engineering, No. 13(4). Pp. 15–25. DOI: 10.9790/1684-1304061525 [in English].

2. Wu, S., Zhang, W., Shen, S., Li X., Muhunthan, B., Mohammad, L. N. (2017). Field-aged asphalt binder performance evaluation for Evotherm warm mix asphalt: comparisons with hot mix asphalt. Construction and Building Materials. No. 156. Pp. 574–583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.028 [in English].

3. Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., Yusoff, N. I. M. (2022). A comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: towards a sustainable asphalt pavement. International Journal of Environmental Research and Public Health, No. 19. Art. 14863. DOI: 10.3390/ijerph191914863. [in English].

4. Caputo, P., Abe, A. A., Loise, V., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., Oliviero Rossi C. (2020). The role of additives in warm mix asphalt technology: an insight into their mechanisms of improving an emerging technology. Nanomaterials, No. (10)6. Art. 1202. DOI: 10.3390/nano10061202.

5. Rahman, M. A., Ghabchi, R., Zaman, M., Ali, S. A. (2021). Rutting and moisture-induced damage potential of foamed warm mix asphalt (WMA) containing RAP. Innovative Infrastructure Solutions.. No. 6. P. 1–11. DOI: 10.1007/s41062-021-00528-7.

6. Pérez-Martínez, M., Moreno-Navarro, F., Martín-Marín, J., Ríos-Losada, C., Rubio-Gámez, M. C. (2014). Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction. *Journal of Cleaner Production*, No. 65. Pp. 374–379. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.09.012.
7. Ai, C., Li, Q. J., Qiu, Y. (2015). Testing and assessing the performance of a new warm mix asphalt with SMC. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, No. 2. Pp. 399–405. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.10.002.
8. Ma, H., Zhang, Z., Zhao, X., Wu, S. (2019). A comparative life cycle assessment (LCA) of warm mix asphalt (WMA) and hot mix asphalt (HMA) pavement: a case study in China. *Advances in Civil Engineering*, No. 2019. Art. 9391857. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/9391857/>.
9. Mudrychenko, A., Savenko, V., Illiash, S., Honcharenko, V. (2024). Determination of the weight of factors affecting the physical and mechanical characteristics of warm asphalt concrete mixtures. *World Science*, No. 1(83). DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30032024/8116 [in English].
10. Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G., Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*. No. 36. Pp. 1016–1024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038.
11. Cheraghian, G., Falchetto, A. C., You, Z., Chen, S., Kim, Y. S., Westerhoff, J., Ki, H. M., Wistuba, M. P. (2020). Warm mix asphalt technology: an up-to-date review. *Journal of Cleaner Production*, No. 268. Art. 122128. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122128.
12. Savenko, V. Ya., Mudrychenko, A. Ya., Ilyash, S. I., Goncharenko, V. V. (2024). Optyimizatsiya temperatury pryhotuvannya, vmistu enerhozberihayuchoyi dobavky ta asfal'tobetonnoyi krykhty pid chas vyhotovlennya teplykh asfal'tobetonnykh sumishey [Optimization of the preparation temperature, the content of energy-saving additives and asphalt concrete crumb during the production of warm asphalt concrete mixtures]. *Roads and Bridges*, No. 29. Pp. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.093> [in Ukrainian].
13. Savenko, V. Ya., Mudrychenko, A. Ya. (2023). Doslidzhennya stiykosti do utvorennia kolyi teplykh asfal'tobetonnykh sumishey na osnovi bitumu z vykorystannyam enerhozberihayuchykh dobavok ta spinenoho bitumu z dodavannyam rehenerovanoho asfal'tobetonu [Research on the rutting resistance of warm asphalt concrete mixtures based on bitumen using energy-saving additives and foamed bitumen with the addition of regenerated asphalt concrete]. *Roads and Bridges*, No. 27. Pp. 121–129. DOI: 10.36100/dorogimosti2023.27.121. [in Ukrainian].
14. Savenko, V. Ya., Mudrychenko, A. Ya., Stasyuk, T. O. (2023). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya dotsil'nosti zastosuvannya teplykh asfal'tobetonnykh sumishey dlya ulashtuvannya shariv dorozhn'oho odyahu [Feasibility study of the feasibility of using warm asphalt concrete mixtures for arranging road surfaces]. *Bulletin of NTU*, No 55. Pp. 240–246. DOI: 10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246 [in Ukrainian].
15. Mudrychenko, A. Ya., Savenko, V. Ya. (2018). Udoskonalennya tekhnolohiyi budivnytstva asfal'tobetonnykh shariv z vykorystannya teplykh sumishey [Improving the technology of construction of asphalt concrete layers using warm mixtures]. *Scientific and technical collection "Highways and road construction"*. Kyiv: NTU, No. 103. Pp. 075–083. Retrieved from: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/75.pdf [in Ukrainian].
16. Kishchinsky, S. V., Kopynets, I. V., Sokolov, O. V. (2017). Vykorystannya enerhozberihayuchykh dobavok dlya znyzhennya tekhnolohichnykh temperatur pryhotuvannya asfal'tobetonnykh sumishey [Use of energy-saving additives to reduce technological temperatures of asphalt concrete mixtures preparation]. *Highways and road construction*. No 99. Pp. 49–57 [in Ukrainian].

17. Kataloh suchasnykh materialiv dlya budivnytstva, remontiv ta ekspluatatsiynoho utrymannya avtomobil'nykh dorih [Catalog of modern materials for construction, repairs and operational maintenance of highways]. SE "NIRI" Kyiv, 2020 [in Ukrainian].

18. DSTU 4044:2019. Bitumy naftovi dorozhni v"yazki. Tekhnichni umovy [Oil road bitumens, viscous. Technical conditions]. Effective from 2020-05-01. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=84291 [in Ukrainian].

19. Sidun, I., Chuguyenko, S., Koryuk, V., Baranovych, Y. & Teshchyshyn, N. (2025). Physical and mechanical properties of bitumen modified with energy-saving additives based on surface-active substances. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, No. 2(65). Pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2025.65.4179> [in English].

20. DSTU B V.2.7-119:2011. Sumishi asfal'tobetonni i asfal'tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy [Asphalt concrete mixtures and asphalt concrete for roads and airfields. Technical conditions]. Amendment No. 1.

21. DSTU EN 12697-31:2021. Bitumomineral'ni sumishi. Metody vyprovuvannya. CH. 31. Pidhotuvannya zrazka hiratornym ushchil'nyuvachem [Bituminous mixtures. Test methods. Part 31. Sample preparation with a gyratory compactor] (EN 12697-31:2019, IDT).

22. Selection of the composition of the Superpave mixture. Asphalt Institute Superpave Series, No. 2 (SP-2) Third Edition (2001).

Сідун Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг та мостів, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: 0000-0003-3606-6899. Тел.: +38 (068) 463 88 40. E-mail: yurii.v.sidun@lpnu.ua.

Чугуєнко Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О. К. Біруля, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0001-6802-5587. E-mail: chuguenko@gmail.com.

Корюк Володимир Павлович, кандидат технічних наук, асистент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О. К. Біруля, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0009-0002-9908-3856. E-mail: korukvov@gmail.com.

Кулік Даниїл Олександрович, аспірант кафедри автомобільних доріг та мостів, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: /0009-0006-2554-5295. E-mail: danyil.o.kulikov@lpnu.ua.

Тещин Назарій Романович, студент групи БДМ-11, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: 0009-0004-3360-2099. E-mail: nazarii.teshchyshyn.mnbdm.2025@lpnu.ua.

Iurii Sidun, PhD (Tech). Associate Professor, department of highways and bridges, Lviv Polytechnic National University. ORCID iD: 0000-0003-3606-6899. Tel.: +38 (068) 463 88 40 E-mail: yurii.v.sidun@lpnu.ua.

Sergiy Chuguyenko, PhD (Tech), Associate Professor department construction and operation of highways named after O. K. Birulya, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0001-6802-5587. E-mail: chuguenko@gmail.com.

Volodumir Koryuk, PhD (Tech), Assistant Professor department construction and operation of highways named after O. K. Birulya, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0009-0002-9908-3856. E-mail: korukvov@gmail.com.

Danyil Kulikov, postgraduate student, department of highways and bridges, Lviv Polytechnic National University. ORCID iD: 0009-0006-2554-5295. E-mail: danyil.o.kulikov@lpnu.ua.

Nazarii Teshchyshyn, master, group BDM-11, Lviv Polytechnic National University. ORCID iD: 0009-0004-3360-2099. E-mail: nazarii.teshchyshyn.mnbdm.2025@lpnu.ua.

Дата надходження статті 28.01.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 10.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.
