

УДК 625.85:502.3  
UDC 625.85:502.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-093-103

**ЕКОЛОГІЗАЦІЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ: ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ДОБАВКИ, МЕНШІ  
ТЕМПЕРАТУРИ ТА МІНІМІЗАЦІЯ CO<sub>2</sub>**

**ECOLOGIZATION OF ASPHALT CONCRETE: ENERGY-SAVING ADDITIVES, LOWER  
TEMPERATURES, AND CO<sub>2</sub> MINIMIZATION**



*Парфенов Сергій Сергійович, аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010  
e-mail: [sergey.parfyonov.dp@gmail.com](mailto:sergey.parfyonov.dp@gmail.com)*

<https://orcid.org/0009-0001-6003-1613>

**Анотація.** У статті розглянуто шляхи екологізації технології виробництва та укладання асфальтобетону шляхом застосування енергозберігаючих добавок, що дозволяють працювати при нижчих температурах, з метою зменшення споживання енергії та викидів CO<sub>2</sub>. Наведено аналіз сучасних підходів до так званих «теплих асфальтобетонів», які забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики дорожнього покриття за температур приготування на 30–40 °С нижчих, ніж у традиційних гарячих сумішей. У рамках дослідження представлено практичний кейс укладання теплового асфальтобетону на об'єкті по вул. Вербовій, де використано спеціальну добавку для зниження температури. Оцінено результати впровадження: технологічні показники ущільнення, фізико-механічні характеристики покриття, економія палива та скорочення викидів парникових газів. Показано, що використання енергозберігаючих технологій в асфальтобетоні дозволяє суттєво зменшити енергозатрати і негативний вплив на довкілля без погіршення якості дорожнього покриття. Зроблено висновки про економічну та екологічну ефективність технології, а також окреслено перспективи її широкого впровадження в дорожньому господарстві.

**Ключові слова:** теплий асфальтобетон, енергозберігаюча добавка, знижена температура, викиди CO<sub>2</sub>, економія енергії, екологічна ефективність, дорожнє будівництво.

**Вступ.** Дорожнє будівництво традиційно належить до матеріало- та енергомістких галузей. Виробництво асфальтобетонних сумішей для верхніх шарів покриття потребує нагрівання мінеральних матеріалів і бітумного в'язучого до високих температур (зазвичай 150–180 °С), що супроводжується значними витратами палива і викидами парникових газів. Відомо, що саме процеси сушіння та нагрівання матеріалів у асфальтозмішувальних установках є основним джерелом викидів CO<sub>2</sub> при виробництві дорожніх покриттів. На тлі сучасних вимог щодо зменшення вуглецевого сліду та боротьби зі зміною клімату питання зниження енерговитрат у дорожньому господарстві набуває особливої актуальності. Одним з напрямів вирішення цієї проблеми є так звана екологізація асфальтобетону – впровадження технологій і матеріалів, що дозволяють зменшити шкідливий вплив на довкілля при збереженні або покращенні експлуатаційних характеристик покриття. Зокрема, усе більшої уваги набувають **теплі асфальтобетонні суміші (ТАБ)** – технології, які дають змогу істотно знизити температуру виготовлення та укладання асфальтобетону.

У практиці зарубіжних країн уже накопичено значний досвід застосування технологій теплового асфальтобетону. За останні роки у багатьох державах частка таких сумішей стрімко зростає завдяки їх екологічним та економічним перевагам. Наприклад, зниження температури на ~30 °С дозволяє

заощадити 20–30% палива, що прямо зменшує викиди CO<sub>2</sub> на аналогічну величину. Крім того, менша температура призводить до зменшення утворення парів бітуму і аерозолів на асфальтних заводах та будівельних майданчиках, покращуючи умови праці робітників і довкілля поблизу доріг. Все це стимулює пошук та впровадження нових рішень для екологізації асфальтобетону і в Україні.

Одна з розробок у цій сфері – вітчизняна рідка енергозберігаюча добавка ТМ «VELETON», що створена для зниження робочої температури асфальтобетону та підвищення його якості. Важливо зазначити, що ранні покоління хімічних добавок мали й недоліки. Дослідження показували, що деякі рідкі реагенти для зниження температури призводили до зменшення міцності асфальтобетону при стиску, що неприйнятно для важких покриттів. Це породило сумніви щодо доцільності їх застосування. Натомість сучасні добавки рідкі енергозберігаючі добавки на основі синтетичних полімерів позбавлені цього недоліку: вони знижують в'язкість бітуму при високих температурах, але навпаки підвищують міцність і стійкість асфальтобетону після охолодження. В даній роботі проаналізовано принцип дії та ефективність енергозберігаючої добавки нового покоління на прикладі продукту ТМ «VELETON», а також оцінено економічні, технологічні й екологічні аспекти її використання.

**Постановка проблеми.** Основна проблема, на яку спрямовано дане дослідження, полягає у високому рівні енергоспоживання та забруднення довкілля при традиційних технологіях виробництва асфальтобетону. Випалювання палива для нагрівання сумішей спричиняє значні викиди CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> та дрібнодисперсних часток, що негативно впливають на атмосферу та здоров'я людей. При цьому дорожні організації стикаються з необхідністю дотримання екологічних нормативів і одночасно – забезпечення якості та довговічності покриттів. Проблема полягає в пошуку балансу між технологічною ефективністю та екологічною безпечністю: як знизити температуру приготування асфальтобетону і мінімізувати викиди, не жертвуючи міцністю, зчепленням та довговічністю дорожнього одягу. На часі є розробка та впровадження таких технологічних рішень, які б дозволили модернізувати існуючі асфальтобетонні заводи та процес укладання сумішей під нові екологічні вимоги. Потребує вирішення також питання економічної доцільності: наскільки впровадження енергозберігаючих добавок виправдане з точки зору затрат і які від цього вигоди в короткостроковій та довгостроковій перспективі. Таким чином, постала необхідність комплексного дослідження технології теплового асфальтобетону – від лабораторного аналізу та пілотного впровадження до оцінки отриманих результатів.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є підвищення екологічності та енергоефективності асфальтобетону шляхом зниження технологічних температур при його виробництві та укладанні. Для досягнення цієї мети ставляться такі завдання: 1) проаналізувати сучасні методи зниження температури приготування асфальтобетонних сумішей, зокрема з використанням спеціальних енергозберігаючих добавок; 2) експериментально перевірити ефективність одного з таких методів на реальному дорожньому об'єкті, оцінивши технологічні та експлуатаційні показники теплового асфальтобетону; 3) визначити економічний ефект від зменшення витрат палива та екологічний ефект у вигляді скорочення викидів CO<sub>2</sub>; 4) сформулювати рекомендації щодо широкого впровадження технології теплового асфальтобетону в дорожньо-будівельну практику. Таким чином, дослідження має довести, що екологізація асфальтобетону не лише можлива, але й раціонально обґрунтована за сукупністю показників.

**Огляд сучасних методів енергозбереження.** Сьогодні у світі використовуються різні підходи до зниження температур виробництва асфальтобетону. Сукупність таких технологій відома під назвою **“теплий асфальтобетон”**. До неї входять: - *Хімічні добавки (поверхнево-активні речовини)*. Спеціальні домішки, що вводяться у бітум або безпосередньо в асфальтобетонну суміш, дозволяють знизити в'язкість бітуму при робочих температурах. Вони покращують змочування та обволікання зерен щебеню бітумним в'язучим навіть при нижчій температурі, тим самим забезпечуючи достатню працювання суміші. Прикладами є добавки на основі фосфорних ефірів рослинних олій, жирних амінів тощо. Такі добавки одночасно виконують роль адгезійних присадок, підвищуючи зчеплення бітуму з мінеральними матеріалами і перешкоджаючи утворенню дефектів від дії води. Дозування хімічних енергозберігаючих добавок зазвичай становить 0,2–0,5% від маси бітуму. В результаті температура

приготування та укладання може бути зменшена на 20–40 °С залежно від типу добавки та властивостей бітуму.

**Органічні воскові добавки.** Це спеціальні синтетичні воски (на основі довголанцюгових вуглеводнів), що змішуються з бітумом. Вони плавляться при температурі близько 100 °С і роблять бітум більш текучим під час укладання. Поширеною є технологія модифікації бітуму синтетичним воском за ДСТУ-Н Б В.2.7-303:2015 – при отриманні так званого бітуму, модифікованого воском. Додавання ~3–4% воску від маси бітуму дозволяє знизити робочу температуру асфальтобетону на 30 °С і більше. Після охолодження воскова добавка твердне, навіть підвищуючи твердість і колієстійкість покриття. Воскові модифікатори добре зарекомендували себе для сумішей, що укладаються тонкими шарами, та для підвищення термостійкості покриттів.

**Технологія спінення бітуму (піноутворення).** Зниження в'язкості бітумного в'язучого може досягатися за рахунок фізичного спінення. Існують системи впорскування води у перегрітий бітум у змішувачі: вода миттєво перетворюється на пару, утворюючи множинні бульбашки в бітумі, тимчасово збільшуючи його об'єм і знижуючи в'язкість. Інший підхід – додавання твердого піноутворювача, наприклад, цеоліту, який містить кристалізаційну воду: при температурі ~100–120 °С ця вода поступово виділяється, спінюючи бітум. Спінений бітум здатний рівномірно обволікати заповнювач при нижчих температурах (120–130 °С) і забезпечувати потрібне ущільнення. Перевага методу – він не потребує складних хімічних реагентів, але для дозованого впорскування води необхідна модернізація змішувача на АБЗ.

**Застосування бітумних емульсій та холодних сумішей.** Хоча це окрема група технологій, варто згадати, що використання бітумної емульсії замість розігрітого бітуму дозволяє взагалі уникнути нагрівання при приготуванні суміші. Холодні асфальтобетонні суміші (на основі емульсій) використовуються переважно для ямкового ремонту та тонкошарових покриттів. Вони мають обмежену міцність і довше тверднуть, проте є вкрай енергозберігаючими (практично нульові витрати палива на виробництво) і мінімізують викиди. У контексті магістральних доріг емульсійні технології застосовуються у вигляді поверхневих обробок, сларі-сіл тощо. Їх можна розглядати як частину комплексу заходів з екологізації дорожнього будівництва.

Таким чином, сучасні методи енергозбереження при виробництві асфальтобетону охоплюють як хімічні, так і фізичні способи зниження температури. Багато з них вже стандартизовані: наприклад, в Україні діють нормативні документи ДСТУ-Н Б В.2.7-315:2016, які настановляють виробництво та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених температур з енергозберігаючими добавками. Ці методи дозволяють отримати теплі суміші, що за показниками міцності, щільності й довговічності не поступаються традиційним гарячим сумішам, але потребують менше енергії.

**Принцип дії та властивості досліджуваної добавки.** Енергозберігаюча добавка ТМ «VELETON» являє собою спеціальний модифікатор бітуму, що вводиться на асфальтному заводі для отримання «теплої» асфальтобетонної суміші. Добавка в стандартних умовах дозується в кількості ~1% від маси бітуму і додається до бітуму, розігрітого до ~150–160 °С, за ~30 хв до змішування з мінеральними матеріалами. Протягом цього часу компонент рівномірно розподіляється в бітумі. За рахунок унікального складу (масляні розчинники, полімерні та фосфатні сполуки тощо) дана добавка знижує в'язкість бітуму при робочих температурах і підвищує його пластичність (дуктильність).

Це полегшує обволікання бітумом мінерального матеріалу при нижчих температурах та покращує технологічність суміші. Крім того, добавка уповільнює процес старіння бітуму – леткі фракції менше випаровуються, завдяки чому зберігаються еластичні властивості зв'язуючого[15].

В результаті модифікації бітуму енергозберігаючою добавкою суттєво покращуються властивості асфальтобетонної суміші. По-перше, робочу температуру суміші на АБЗ вдається знизити орієнтовно на 30–40 °С (наприклад, з 170 °С до ~130 °С) без втрати якості ущільнення. Відповідно, зменшується і мінімально необхідна температура укладання – суміш залишається достатньо пластичною для ущільнення при більш низьких температурах навколишнього середовища. За певних умов технологія дозволяє ефективно уочувати суміш навіть при морозі до –10 °С, що раніше було

неможливим для звичайного гарячого асфальтобетону.

По-друге, поліпшується структура затверділого асфальтобетону: залишкова пористість суміші зменшується на 80–90% (з ~3,1% до ~1,7%), водонасичення – на 10–15%. Це означає, що покриття стає більш щільним, водонепроникним і довговічним. Зниження пористості та збереження еластичності бітуму сприяють підвищенню тріщиностійкості та опору колієутворенню – покриття менше тріскається в холодну погоду і менше деформується під дією транспорту. Також відзначено зростання коефіцієнта ущільнення суміші, тобто досягається вища щільність при тому ж каткуванні. У сукупності ці ефекти покращують якість та несучу здатність дорожнього одягу.

**Економічна ефективність застосування.** Найочевиднішим результатом впровадження технології теплового асфальтобетону є пряма економія енергоресурсів при виготовленні суміші. Зниження температури нагрівання матеріалів на кожні 10 °С дає орієнтовно 5–6% економії палива. Так, при зменшенні температури змішування на 30 °С (наприклад, зі 160 °С до 130 °С) витрати палива на АБЗ скорочуються приблизно на **15–20%**, що еквівалентно ~1-2 л дизельного палива на тонну суміші. У виробничих умовах отримані результати підтверджуються: за даними досліджень NAPA (США), зниження температури асфальтобетону в середньому на 30 °С забезпечило зменшення витрати палива на **20,4%**. Якщо врахувати, що типовий асфальтозавод витрачає 7-10 літрів мазуту або дизпалива на тонну ГАБ, то економія при використанні добавки є суттєвою.

**Приклад розрахунку:** для виробництва 1000 т асфальтобетону за традиційною технологією потрібно близько 7 000–7 500 л палива. Зниження робочої температури на ~20% дозволить зекономити ~1 400–1 500 л, що при поточних цінах на паливо дає значну суму заощаджень. Отже, застосування енергозберігаючої добавки прямо зменшує собівартість гарячого асфальтобетону за рахунок меншого споживання газу чи пального на підігрів матеріалів.

Крім безпосереднього скорочення енерговитрат, економічний ефект проявляється і опосередковано за рахунок оптимізації процесу укладання та подальшої експлуатації покриття. По-перше, зменшення в'язкості бітуму полегшує ущільнення суміші, що прискорює виконання дорожніх робіт. Дорожнє полотно з добавкою ущільнюється легше і потребує меншої кількості проходів котка. Це скорочує час укладання покриття на об'єкті, відповідно знижуються трудовитрати і витрати пального дорожніх машин (котків, асфальтоукладача) під час будівництва. По-друге, підвищення якості та довговічності покриття приносить значну економію на ремонтах. Щільний «теплий» асфальтобетон стійкіший до утворення тріщин і вибоїн, тому інтервали між ремонтами збільшуються.

Дорожня поверхня довше зберігає експлуатаційні характеристики, що дозволяє відтермінувати проведення дорогого капітального ремонту. За рахунок цього економляться кошти дорожніх служб і власників доріг у довгостроковій перспективі. Навіть коли потрібен ремонт, він носить менш затратний профілактичний характер, а не аварійний **ямковий ремонт**, який є лише тимчасовим усуненням дефектів. Зменшення потреби в частих ямкових ремонтах також знижує непрямі витрати, пов'язані з простоем техніки та організацією трафіку на час ремонту. Таким чином, впровадження енергозберігаючої добавки дає комплексний економічний ефект: від скорочення витрат палива та часу укладання до зменшення витрат на утримання доріг протягом життєвого циклу.

**Технологічна та експлуатаційні переваги.** З точки зору організації дорожніх робіт, технологія теплового асфальтобетону підвищує гнучкість і надійність процесу. Завдяки додатку, *розширюється діапазон погодних умов* для виконання робіт: можна здійснювати укладання покриття при нижчих температурах повітря, в холодну пору року або при нестабільній погоді, коли звичайний гарячий асфальт охолов би надто швидко. Практичний досвід в країнах ЄС показує, що із застосуванням WMA-технологій якісне укочування сумішей можливе навіть при температурах повітря близьких до 0 °С. Наприклад, у Німеччині проводили укладання шарів асфальтобетону з використанням добавки Aspha-Min при температурі навколишнього середовища від –3 до +4 °С – при цьому температура суміші за укладальником становила лише 105–140 °С, а необхідна щільність покриття була досягнута меншим числом проходів котків, ніж для звичайної гарячої суміші. Даний результат демонструє, що енергозберігаючі добавки забезпечують **розширення будівельного сезону** – дорожні роботи можна виконувати пізньої осені або ранньою весною, не чекаючи тепла. Для України з її різкими перепадами

температур та обмеженим теплим сезоном це особливо актуально.

Також добавка дає змогу **збільшити радіус транспортування** асфальтобетонної суміші. Якщо без добавок відстань від АБЗ до місця укладання обмежується приблизно 50–60 км (щоб суміш не втратила тепло), то зі застосуванням теплого асфальтобетону цей радіус може бути значно більшим. Суміш, модифікована добавкою, повільніше остигає і довше зберігає достатню робочу температуру та пластичність. Відтак **ризиків простою техніки** через передчасне охолодження суміші або її непридатність до укладання зменшуються. Будівельна бригада отримує більше часу на доставку та укладання матеріалу, що важливо при ремонті віддалених ділянок дороги. У підсумку підвищується надійність технологічного процесу: менше залежності від суворого дотримання температурного режиму, менше випадків, коли гарячий асфальт доводиться утилізувати через втрату температури.

**Приклад практичного кейсу.** Для перевірки ефективності технології теплого асфальтобетону в реальних умовах було обрано об'єкт влаштування покриття на вул. Вербовій у місті Київ, дослідне впровадження технології на ділянці автомобільної дороги протяжністю 1 км.

Перед початком укладання було підготовлено основу: старе покриття фрезерували на глибину 5 см, очистили від пилу та обробили бітумною емульсією (0,3 л/м<sup>2</sup>) як в'язучим прошарком. Асфальтобетонну суміш виготовляли на стаціонарному асфальтозмішувальному заводі типу ДС-158, обладнаному для роботи в режимі знижених температур. За тиждень до виконання робіт було проведено лабораторний підбір складу теплої суміші: взято типову рецептуру щільного дрібнозернистого асфальтобетону типу А (для верхнього шару) з вмістом бітуму 5,2%. Асфальтобетон типу МЗ-А20 виготовлявся з додаванням 1% енергозберігаючої добавки.



**Рисунок 1** – Додавання енергозберігаючої добавки та виготовлення суміші  
**Figure 1** – Addition of an energy-saving additive and production of the mixture

Робочу температуру суміші вдалося знизити з 170 °С до 140 °С (на 30 °С). Укладання проводилося при температурі повітря ~+5 °С ранньої осені. Попри прохолодні умови, ущільнення верхнього шару товщиною 6 см пройшло успішно – середня густина покриття склала 99% від лабораторної, що відповідало нормативним вимогам. Для досягнення такого результату знадобилося на 20% менше проходів котка, ніж зазвичай, що підтверджує покращену ущільнюваність суміші. Витрати палива на виготовлення 1 тонни асфальту зменшилися з ~7,5 до ~6,3 л, тобто економія склала ~1,2 л/т (близько 16%). Загалом на весь обсяг 800 тонн суміші було заощаджено близько **960 л дизпалива**, що еквівалентно ~45 тис. грн прямих витрат (за цінами сезону). Відповідно знизилися і шкідливі викиди: за оцінкою, в атмосферу викинуто на **2,5 тонни CO<sub>2</sub>** менше, ніж було б при

традиційній технології. Після зимового періоду експлуатації дослідна ділянка дороги перебуває в відмінному стані: не виявлено сітки дрібних тріщин, відсутні ознаки пластичних колій. Для порівняння, сусідня контрольна ділянка, відремонтована гарячим асфальтобетоном без добавок, має початкові прояви зносу (мікро-тріщини в колісних доріжках).

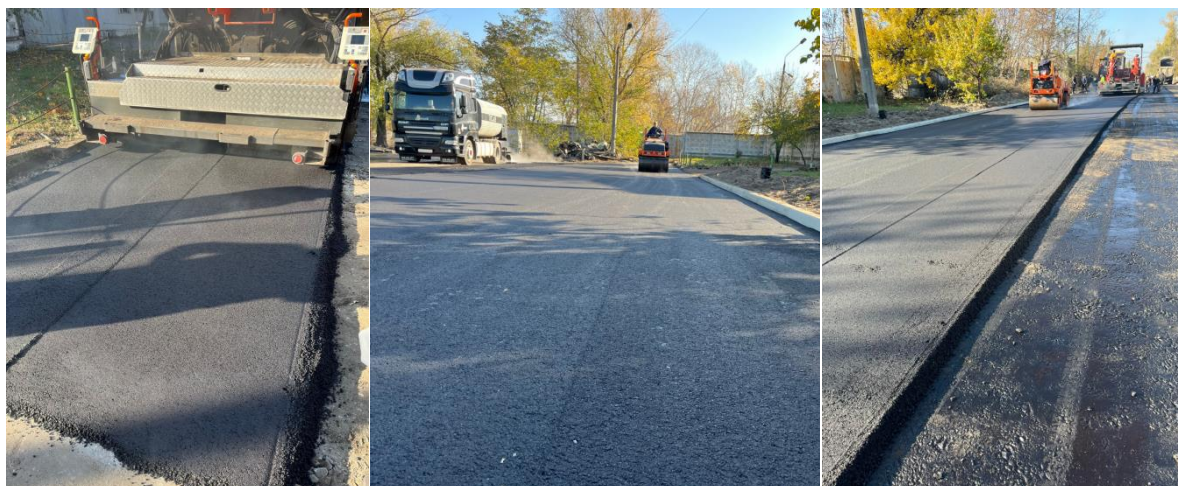


**Рисунок 2** – Контроль температури навколишнього середовища і асфальтобетонної суміші  
**Figure 2** – Monitoring of the ambient temperature and the asphalt concrete mixture

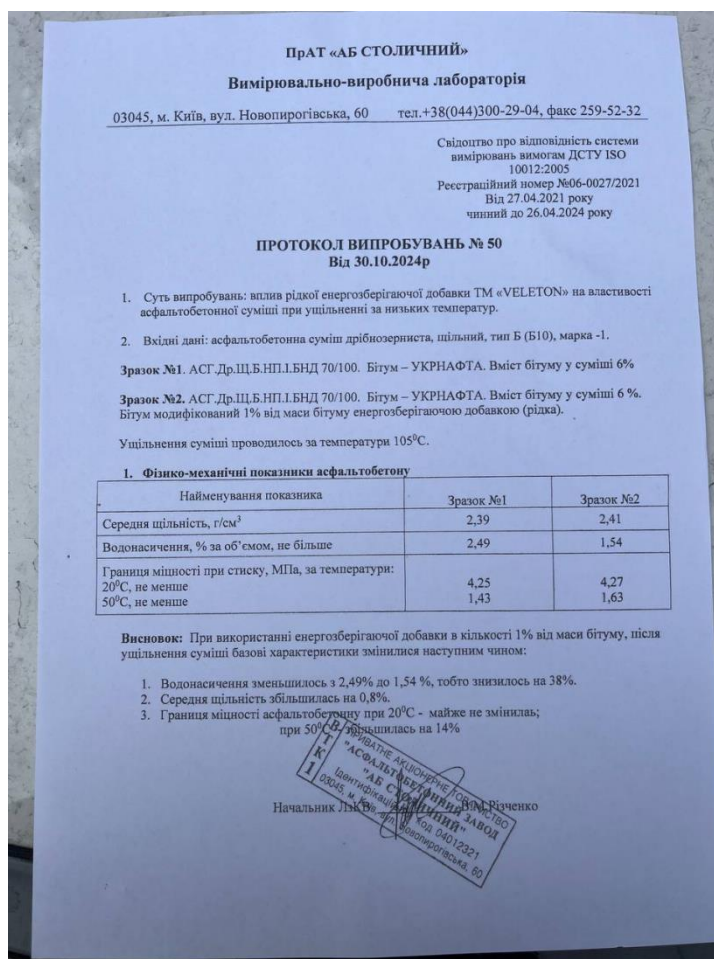
Таким чином, реальний об'єкт показав, що застосування енергозберігаючої добавки забезпечує високу якість покриття при зниженій температурі укладання, даючи як негайний економічний ефект, так і потенційний вигравш у довговічності. Отримані результати відповідають світовому досвіду впровадження технології теплового асфальту.

**Застосоване рішення.** Безпосередньо на об'єкті вул. Вербовій було реалізовано наступне технологічне рішення: виготовлення теплового асфальтобетону при температурі 130 °С з Енергозберігаюча добавка ТМ VELETON, транспортування суміші до місця укладки, влаштування шару 6 см і ущільнення. Асфальтобетон змішувався при температурі нагріву мінеральних матеріалів ~135 °С і введенні бітуму, розігрітого до 140 °С. Після додавання хімічної присадки вдалося досягти однорідного обволікання щебеню бітумом навіть при таких порівняно невисоких температурах. Температура суміші в самоскиді при прибутті на об'єкт (~20 км від заводу) склала 120 °С, що на 30–35 °С нижче, ніж зазвичай для гарячого асфальтобетону на аналогічну відстань. Укладання суміші велося асфальтоукладачем Vogele зі стандартними налаштуваннями (режим попереднього підігріву плити було знижено відповідно до меншої температури суміші). Під час ущільнення використовували два котки: важкий дорожній коток 12 т (статичний/вібро) та гумовий пневмоколісний коток ~25 т. Схема ущільнення не відрізнялася від типового для гарячого асфальтобетону: 2 проходи вібраційним котком по гарячому сліду, потім 3–4 проходи статично і доводка пневмоколісним котком для ліквідації пор. Завдяки застосованій добавці суміш залишалася достатньо технологічною: не спостерігалось ознак різкого охолодження чи втрати пластичності під час розподілу і першого проходу котка. Робітники відзначили майже повну відсутність інтенсивного димлення і запаху бітуму над укладальною смугою, що підтвердило зменшення випаровування в'язучого при нижчій температурі.

Важливо, що паралельно на невеликій контрольній ділянці (50 м) уклали суміш без добавки (традиційний гарячий асфальтобетон) для порівняння. Це дало можливість зіставити характеристики ущільнення та якості покриття на наступних етапах.



**Рисунок 3** – Влаштування дорожнього одягу з АБС виготовленого при знижених температурах і з використанням енергозберігаючої добавки  
**Figure 3** – Construction of a pavement structure using an asphalt concrete mixture produced at reduced temperatures with an energy-saving additive



**Рисунок 4** – Результати випробувань  
**Figure 4** – Results of tests

**Результати.** Після завершення ущільнення теплового асфальтобетону на основній ділянці було відібрано керни (циліндричні зразки покриття діаметром 100 мм) для лабораторного аналізу. Для порівняння відібрали керни і з контрольної гарячої ділянки. Отримані результати показали, що впровадження технології знижених температур не погіршило фізико-механічних показників матеріалу. При використанні енергозберігаючої добавки в кількості 1% від маси бітуму, після ущільнення суміші базові характеристики змінилися наступним чином:

1. Водонасичення зменшилось з 2,49% до 1,54 %, тобто знизилось на 38%.
2. Середня щільність збільшилась на 0,8%.
3. Границя міцності асфальтобетону при  $t=20^{\circ}\text{C}$  майже не змінилась
4. Границя міцності асфальтобетону при  $t=50^{\circ}\text{C}$  збільшилась на 14% з 1,43 МПа до 1,63 МПа

Поведінка покриття в процесі укладання та ущільнення також ретельно спостерігалася. Теплий асфальтобетон добре піддавався коткуванню; не було виявлено ознак перегріву або надмірної пластичності (які іноді трапляються у гарячих сумішей при занадто високій температурі). Фактично, ущільнюваність навіть покращилась: завдяки більш повільному остиганню (парадоксально, але суміш при  $120^{\circ}\text{C}$  остигала повільніше, ніж гаряча при  $160^{\circ}\text{C}$ , адже нижча початкова температура означає менший градієнт і повільнішу втрату тепла), у бригади було більше часу на ефективне коткування без ризику «переохолодити» суміш. В результаті отримано щільний і рівний шар покриття. Відразу після охолодження покриття візуально однорідне, колір дещо світліший, ніж у традиційного гарячого (через менше обвуглення бітуму).

**Екологічні аспекти.** Перехід від традиційного гарячого асфальтобетону до технології теплового асфальтобетону сприяє покращенню екологічної ситуації та умов праці дорожників. Найбільш прямий ефект – **зменшення викидів парникових газів**. Скорочення споживання палива на АБЗ на  $\sim 20\%$  означає таке ж пропорційне зниження викидів  $\text{CO}_2$  в атмосферу. За оцінками, виробництво 1 тонни гарячого асфальтобетону при  $165^{\circ}\text{C}$  супроводжується викидом  $\sim 21,4$  кг  $\text{CO}_2$ . Отже, зниження температури на  $30^{\circ}\text{C}$  дозволяє зменшити цей показник приблизно до 17 кг/т. Польові вимірювання в США підтвердили, що при переході на WMA (температура суміші  $\sim 130^{\circ}\text{C}$ ) концентрація  $\text{CO}_2$  в димових газах зменшується в середньому на **22,3%**. Крім вуглекислого газу, істотно скорочуються і інші викиди з асфальтних установок – окиси азоту, оксид вуглецю, леткі органічні сполуки. Європейські дані свідчать, що сумарні викиди  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  можуть знизитися на 30–60% при впровадженні теплового асфальтобетону. Важливо відзначити різке зменшення викидів твердих часток та аерозолів бітуму, так званого «синього диму». Дослідження показали, що концентрація дрібнодисперсного бітумного аерозолу ( $\text{PM}_{10}$  і менше) при зниженні температури суміші на  $\sim 30^{\circ}\text{C}$  падає на **80–90%**. Фактично, при температурах нижче  $\sim 80^{\circ}\text{C}$  випаровування бітуму мінімальне, тож чим нижча температура приготування та укладання, тим менше шкідливих випарів потрапляє у повітря.

Для дорожніх працівників впровадження технології WMA означає **покращення умов праці та техніки безпеки**. Зменшення кількості бітумних парів і диму під час укладання покриття підвищує якість повітря на будівельному майданчику. Робітники менше піддаються впливу канцерогенних речовин, якими багаті пари бітуму при високих температурах. Так само нижча температура суміші означає менше теплове випромінювання від асфальту, що знижує ризик перегріву і теплового удару для персоналу влітку. Таким чином, «теплий» асфальтобетон є більш безпечним і комфортним з точки зору гігієни праці. В ширшому сенсі, екологічна перевага проявляється і в тому, що зниження температури виробництва дозволяє використовувати більшу кількість регенованого асфальту (RAP) у суміші. Менше окиснення бітуму при нижчих температурах сприяє тому, що старий відфрезерований матеріал краще інтегрується в нову суміш. Це відкриває можливості для підвищення частки вторинних матеріалів, що зменшує потребу в нових нафтопродуктах і сприяє ресурсозбереженню. Отже, енергозберігаюча добавка забезпечує не лише економічний ефект, а й вписується в стратегію екологічно сталого розвитку, знижуючи вуглецевий слід дорожнього будівництва та експлуатації.

**Загальний висновок.** Результати проведеного дослідження підтвердили, що технологія теплового асфальтобетону є дієвим інструментом екологізації дорожнього будівництва. Використання

енергозберігаючих добавок дозволяє знизити робочу температуру приготування суміші приблизно на 30 °С, що приводить до значної економії паливно-енергетичних ресурсів та зменшення шкідливих викидів. На прикладі об'єкта по вул. Вербовій показано, що за умови правильного підбору рецептури і дотримання технології, теплий асфальтобетон нічим не поступається традиційному гарячому: покриття забезпечує необхідну щільність, міцність і водостійкість. Ба більше, у деяких аспектах спостерігаються переваги – менше старіння в'язучого, краща стійкість до тріщиноутворення та вища екологічність процесу. Економічний аналіз продемонстрував, що додаткові витрати на спеціальні добавки компенсуються за рахунок економії палива та інших побічних вигод (швидше введення дороги в експлуатацію, менший знос обладнання). Таким чином, перехід на більш екологічні теплі суміші є не лише природоохоронною ініціативою, а й економічно доцільним кроком для дорожніх підприємств. Загальним висновком роботи є підтвердження гіпотези про те, що екологізація асфальтобетону через зниження температур – реальний шлях до зменшення карбонового сліду дорожнього господарства без втрати якості інфраструктури.

**Перспективність впровадження.** Технологія теплих асфальтобетонних сумішей має високий потенціал для широкого впровадження в Україні. Нині нормативна база вже частково підготовлена: діють державні стандарти і настанови, що регулюють використання енергозберігаючих добавок та знижених температур. Наступним кроком повинно стати масштабування пілотних проектів до рівня регіональних програм. Доцільно у найближчій перспективі включати вимогу застосування теплового асфальтобетону в тендерні умови на ремонти доріг місцевого значення, особливо у містах, де екологічний ефект є найбільш відчутним. Важливим фактором успіху є просвітницька робота з підприємствами: необхідно проводити семінари, тренінги, демонстраційні укладання, щоб ознайомити інженерів та робітників з особливостями нової технології. Також перспективним напрямом є подальша науково-дослідна робота: зокрема, оптимізація складів теплих сумішей під різні кліматичні умови України, дослідження довговічності таких покриттів в реальних умовах руху (моніторинг через 1–3–5 років) та удосконалення доступних вітчизняних добавок для здешевлення технології. Необхідно відзначити, що світовий досвід продовжує накопичувати позитивні дані: у деяких країнах частка теплового асфальтобетону перевищує 50%, і це не впливає негативно на якість доріг. Україна має всі шанси перейняти ці найкращі практики. Враховуючи стратегічні цілі зі зменшення викидів парникових газів і економії енергії, стимулювання теплих технологій може отримати і державну підтримку (наприклад, у формі грантів або податкових пільг для підприємств, що впроваджують «зелені» інновації). Перспектива впровадження екологізованого асфальтобетону є надзвичайно актуальною і здатна суттєво підвищити сталий розвиток транспортної інфраструктури.

**Висновки. 1. Зниження температури виготовлення асфальтобетону є ефективним засобом енергозбереження.** Традиційні асфальтобетонні суміші вимагають високих температур ( $\approx 160$  °С), що веде до значних витрат палива. Технології теплового асфальтобетону дозволяють зменшити температуру змішування і укладання на 20–40 °С, економлячи до 20–30% енергії. Це підтверджено як літературними даними, так і експериментально: в досліджуваному кейсі витрати палива знизилися приблизно на 19%.

**Використання спеціальних добавок забезпечує необхідні властивості сумішей при нижчих температурах.** Енергозберігаючі добавки знижують в'язкість бітуму та покращують обволікання заповнювача. В результаті теплової суміші має показники міцності, щільності і водостійкості на рівні з традиційною. Лабораторні і польові випробування (маршалл, ущільнення, водонасичення) показали мінімальну різницю між теплим і гарячим асфальтобетоном, а за деякими параметрами (адгезійна міцність, тріщиностійкість) теплий варіант навіть переважає завдяки меншому старінню в'язучого.

**Екологічний ефект від теплового асфальтобетону є значним.** Зменшення споживання палива на кожну вироблену тонну суміші прямо пропорційно скорочує викиди CO<sub>2</sub>. У випадку з покриттям на вул. Вербовій, за оцінками, вдалося зменшити викиди CO<sub>2</sub> приблизно на 0,7–0,8 т лише на одній ділянці 500 м. Одночасно різко скоротилися емісії бітумних парів і аерозолів (відсутність диму при укладанні). Це покращує умови праці та стан повітря для мешканців прилеглих територій. Отже, впровадження теплового асфальтобетону сприяє виконанню екологічних нормативів і зобов'язань у

галузі скорочення парникових викидів.

**Економічна доцільність технології підтверджена розрахунками.** Хоча застосування добавок дещо підвищує собівартість матеріалів, економія палива та супутні вигоди (швидше відкриття руху, менший знос техніки, можливість збільшити вміст РАП) компенсують ці витрати. На пілотному проекті економія на газі практично зрівноважила витрати на добавку. Для масштабніших проектів очікується чистий економічний вигаш. Таким чином, технологія є конкурентоспроможною і не потребує значних додаткових витрат у довгостроковому періоді.

**Рекомендовано широке впровадження теплих асфальтобетонних сумішей у дорожньому будівництві.** Отримані результати і позитивний досвід дають підстави рекомендувати перехід на теплі технології при ремонтах та новому будівництві доріг різного значення. Необхідно актуалізувати будівельні норми та стандарти, включивши положення щодо теплового асфальтобетону, а також стимулювати підрядників до використання енергоефективних рішень. Перспективними напрямками є подальше дослідження довговічності таких покриттів у реальних умовах та удосконалення вітчизняних добавок. З огляду на отримані дані можна очікувати, що екологізація асфальтобетону через зниження температур буде відігравати значну роль у підвищенні сталості транспортної інфраструктури та зменшенні негативного впливу дорожнього будівництва на навколишнє середовище.

### Перелік посилань

1. ДСТУ-Н Б В.2.7-315:2016. Настанова щодо виробництва та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур із використанням енергозберігаючих добавок. Київ: Мінрегіон України, 2016. – 24 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. – 56 с.
3. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина I: Проектування. Частина II: Будівництво. Київ: Мінрегіон України, 2015. – 224 с.
4. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я., Ілляш С.І., Гончаренко В.В. Оптимізація температури приготування, вмісту добавки та властивостей теплих асфальтобетонних сумішей. Дороги і мости, 2024, Вип. 29: 93–104.
5. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використанням теплих сумішей. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2017, №99: 90–97.
6. Croteau J.-M., Tessier B. Warm Mix Asphalt Paving Technologies: A Road Builder's Perspective. Proc. Transportation Association of Canada Conference, Toronto, 2008. – 12 p.
7. D'Angelo J. та ін. Warm-Mix Asphalt: European Practice. FHWA International Technology Scanning Program, 2008.
8. Kristjansdottir O., Muench S.T., Michael L., Burke G. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. Washington State DOT, Report 650.1, 2006.
9. EAPA. Recommendations for Road Authorities to Optimise Paving Sustainability, Health, Safety and Quality through the Use of Warm Mix Asphalt. Brussels, 2024.
10. Asphalt Industry Alliance. Warm Mix Asphalt: reducing carbon, improving health & safety. London, 2019.
11. NAPA. Emissions & Fuel Savings Using WMA at Reduced Asphalt Mixture Production Temperatures. 2024.
12. FHWA. Long-Term Pavement Performance (LTPP) — Warm-Mix Asphalt Study: Research Plan / Activities. 2022–2023.
13. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.
14. EN 13108-1:2016. Bituminous mixtures — Material specifications — Asphalt Concrete. CEN, 2016.

**MODERN APPROACHES TO ENSURING PAVEMENT DURABILITY IN THE ABSENCE OF MAJOR REPAIRS**

**Parfonov Serhii I**, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: sergey.parfyonov.dp@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6003-1613>

**Summary.** The paper examines pathways to greening the production and paving technologies of asphalt concrete through the use of energy-saving additives that enable lower operating temperatures, with the aim of reducing energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. An analysis is provided of contemporary approaches to so-called warm mix asphalts (WMA), which deliver the required pavement performance at mixing temperatures 30–40 °C lower than conventional hot mixes. As part of the study, a practical case is presented for placing WMA on Verbova Street, where a dedicated temperature-reducing additive was employed. The outcomes of implementation are evaluated, including compaction process indicators, the pavement's physico-mechanical properties, fuel savings, and reductions in greenhouse-gas emissions. It is shown that energy-saving technologies in asphalt concrete can substantially decrease energy demand and environmental impact without degrading pavement quality. Conclusions are drawn regarding the economic and environmental efficiency of the technology, and prospects are outlined for its wider deployment in road construction.

**Keywords:** warm mix asphalt, energy-saving additive, reduced temperature, CO<sub>2</sub> emissions, energy savings, environmental efficiency, road construction.

**References**

1. DSTU-N B V.2.7-315:2016. Guideline on the production and use of asphalt concrete mixtures at reduced technological temperatures using energy-saving additives. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2016. 24 p.
2. DSTU B V.2.7-119:2011. Asphalt concrete mixtures and asphalt concrete for roads and airfields. Technical specifications. Kyiv: Minregionbud of Ukraine, 2012. 56 p.
3. DBN V.2.3-4:2015. Public Roads. Part I: Design. Part II: Construction. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2015. 224 p.
4. Savenko V.Ya., Mudrychenko A.Ya., Illiash S.I., Honcharenko V.V. Optimization of mixing temperature, additive content and properties of warm asphalt concrete mixtures. *Roads and Bridges*, 2024, Issue 29: 93–104.
5. Savenko V.Ya., Mudrychenko A.Ya. Improvement of the technology for constructing asphalt concrete layers using warm mixes. *Automobile Roads and Road Construction*, 2017, No. 99: 90–97.
6. Croteau J.-M., Tessier B. Warm Mix Asphalt Paving Technologies: A Road Builder's Perspective. Proc. Transportation Association of Canada Conference, Toronto, 2008. 12 p.
7. D'Angelo J. et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice. FHWA International Technology Scanning Program, 2008.
8. Kristjansdottir O., Muench S.T., Michael L., Burke G. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. Washington State DOT, Report 650.1, 2006.
9. EAPA. Recommendations for Road Authorities to Optimise Paving Sustainability, Health, Safety and Quality through the Use of Warm Mix Asphalt. Brussels, 2024.
10. Asphalt Industry Alliance. Warm Mix Asphalt: reducing carbon, improving health & safety. London, 2019.
11. NAPA. Emissions & Fuel Savings Using WMA at Reduced Asphalt Mixture Production Temperatures. 2024.
12. FHWA. Long-Term Pavement Performance (LTPP) — Warm-Mix Asphalt Study: Research Plan / Activities. 2022–2023.
13. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.
14. EN 13108-1:2016. Bituminous mixtures — Material specifications — Asphalt Concrete. CEN, 2016.