

УДК 625.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.5>

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ В АСФАЛЬТОБЕТОНІ

Краюшкіна Катерина Вікторівна¹, Бондарчук Вадим Сергійович²

¹ кандидат технічних наук,

доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: ekrayushkina15@ukr.net, orcid: 0000-0001-5809-4300

² аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: bondar0071312@gmail.com, orcid: 0009-0007-8864-6584

Анотація. Мета: дослідити вплив біовугілля, отриманого з різних видів рослинної біомаси, на фізико-механічні характеристики асфальтобетонних сумішей із метою підвищення їх екологічної ефективності та експлуатаційних властивостей у дорожньому будівництві.

Методологія. Проведено порівняльний аналіз властивостей біовугілля, одержаного шляхом піролізу різних типів біомаси. На основі цього виготовлено серії асфальтобетонних зразків із частковою заміною мінерального порошку біовугіллям (до 50% маси), які піддано фізико-хімічним і механічним випробуванням для визначення впливу на міцність, водостійкість, температурну стабільність і адгезію.

Результати. Установлено, що оптимальне дозування біовугілля (40–50% маси мінерального наповнювача) сприяє покращенню міцності асфальтобетону, зниженню водонасичення, зменшенню температури укладання суміші та підвищенню стійкості до старіння. Біовугілля також виявило здатність поліпшувати енергоефективність процесу укладання дорожніх покриттів.

Наукова новизна. Уперше систематизовано вплив параметрів біовугілля (розмір частинок, тип біомаси, вологість) на властивості асфальтобетону. Обґрунтовано доцільність заміни частини традиційного мінерального наповнювача на біовугілля без втрати технічних характеристик покриття.

Практична значущість. Результати можуть бути використані під час проектування й упровадження екологічно ефективних дорожніх покриттів із покращеними показниками міцності, довговічності та стійкості до дії води і високих температур. Запропонований підхід сприяє зменшенню викидів CO₂ та раціональному використанню органічних відходів у будівництві.

Ключові слова: біовугілля, асфальтобетон, дорожнє будівництво, піроліз, модифікатори, екологічна ефективність.

ВСТУП

Дорожня індустрія є однією з найбільш матеріаломістких галузей, що створює значний вплив на викиди вуглецю та погіршення стану навколишнього середовища. Водночас зростає занепокоєння науковців щодо змін клімату та підвищується попит на екологічно чисті, природні будівельні матеріали та технології.

Одним із природних матеріалів, який може використовуватися у будівельних цілях, є біовугілля.

Біовугілля – це матеріал, отриманий із біовідходів, здатний зв'язувати вуглець у великих масштабах, має високі фізико-хімічні властивості для застосування як модифікатора асфальту, а також сприяє зниженню

негативного впливу на навколишнє середовище.

Загалом біовугілля має тенденцію покращувати характеристики асфальтових в'язучих та сумішей за високих температур, одночасно знижуючи їх ефективність за низьких температур [1–5].

Біовугілля – це матеріал, багатий на вуглець. Він також містить азот, водень, неорганічні елементи та, можливо, невелику кількість важких металів. Одним із найпоширеніших методів отримання біовугілля є піроліз – термічний процес розкладу в інертному середовищі. Він проводиться за температур від 300°C до 900°C у відсутності кисню.

На властивості біовугілля суттєво впливає швидкість нагрівання, тобто швидкість, з якою підвищується температура піролізованого палива. Якщо швидкість нагріву перебуває в діапазоні 1–10°C/хв, процес вважається повільним піролізом. Якщо ж понад 10°C/с – це швидкий піроліз. Процес швидкого піролізу триває лише кілька секунд, тоді як повільний може тривати годинами.

Зі збільшенням швидкості нагрівання зростає і кількість рідких та газоподібних продуктів, що утворюються з палива. Проте цей ефект переважно помітний за низьких температур, тоді як за високих температур його вплив менш виражений [3–6].

Біомасу для виробництва біовугілля можна отримувати з рослинної, тваринної сировини та промислових відходів. Тип біомаси значною мірою впливає на фізико-хімічні властивості біовугілля, зокрема на площу поверхні, здатність утримувати вологу та пористість.

Розроблення низьковуглецевих та екологічно чистих будівельних матеріалів із підвищеним вмістом біовугілля викликає широкий інтерес.

Хоча застосування біовугілля як компонента в будівельних матеріалах почалося відносно нещодавно, воно має значний потенціал для сталого розвитку завдяки своїм властивостям.

У процесі досліджень визначено фізико-механічні та хімічні властивості біовугілля. Установлено, що біовугілля, яке має пористу природу та високофункціональну поверхню, здатне створювати активні зони для хімічних реакцій і проявляє сумісність з асфальтом та полімерними матеріалами.

Біовугілля, отримане з біомаси, є багатим джерелом вуглецю, що виробляється з біомаси за допомогою термічного спалювання у середовищі з обмеженим вмістом кисню [7–9].

Також біовугілля має низку інших позитивних властивостей. А саме: високу питому площу поверхні, пористу структуру з високим вмістом вуглецю, велику кількість функціональних груп на поверхні, воно дешевше за активоване вугілля та чинить менший негативний вплив на навколишнє середовище. Біовугілля характеризується низькою теплопровідністю, високою хімічною стабільністю та низькою займистістю, є відновлюваним і екологічно чистим матеріалом, а також здатне інгібувати викиди летких органічних сполук. Окрім того, воно демонструє високу стійкість до хімічної та біологічної деградації.

Основною сировиною для виробництва біовугілля є органічні відходи. Біомасові відходи, придатні для виробництва біовугілля, включають залишки сільськогосподарських культур, лісгосподарські відходи, осад стічних вод, тверді побутові відходи тощо [5–9].

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Біовугілля являє собою проникну вуглецеву тверду речовину, отриману шляхом термохімічного перетворення різноманітних біологічних відходів у повітряному середовищі [14–16], і воно не піддається легкому розкладанню завдяки високому рівню ароматизації [2–4; 12–16]. Високий вміст вуглецю у біовугіллі забезпечує ефективне зв'язування вуглецю, сприяючи скороченню викидів парникових газів [10–16].

Окрім основного компонента – вуглецю, біовугілля складається з багатьох допоміжних компонентів, які впливають на його поведінку та функціональність у різних середовищах.

Біовугілля має пористу структуру з численними функціональними групами, окислювачами та поверхневими зарядами, а також велику питому площу поверхні [10–15]. Пориста структура та велика поверхнева площа надають біовугіллю унікальні властивості [5–11], що робить його придатним для покращення характеристик асфальтових сумішей.

Окрім того, Міжурядова група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК/IPCC) визначила біовугілля як технологію з негативними викидами.

Швидкість і простота виготовлення, екологічність, можливість повторного використання та економічна ефективність є перевагами біовугілля над іншими природними матеріалами [9–18].

Подальший розвиток досліджень щодо ролі біовугілля в різних композитах може сприяти створенню нового покоління вуглецево-нейтральних будівельних матеріалів.

Органічні відходи або біомаса є сировиною для виробництва біовугілля, яке складається з вуглецю та золи.

Багато сільськогосподарських і виробничих відходів можуть бути використані як біомаса для виготовлення біовугілля. Основними видами біомаси є: рисова солома [19], пшенична солома [20], деревні відходи [21], водорості [22], відходи цукрового буряка [23], кукурудзяні качани [24] тощо. Ці види біомаси переважно складаються із целюлози, геміцелюлози та лігніну.

Біомаса розглядається як складна тверда або рідка речовина, що складається з біологічного, органічного або неорганічного матеріалу, отриманого з живих організмів.

Біомаса, що використовується для виробництва біовугілля, класифікується на два типи залежно від умісту вологи [25–28]:

- волога (уміст вологи > 30%);
- суха (уміст вологи < 30%).

Ця класифікація визначає відповідний виробничий процес для отримання біовугілля.

Також біомаса поділяється на два типи:

- деревна біомаса;
- недеревна біомаса.

Деревна біомаса переважно включає деревні відходи та лісгосподарські залишки [24–28]. Основні характеристики деревної біомаси: низький вміст вологи, низька пористість, менша пустотність, висока щільність та теплота згоряння.

Недеревна біомаса включає відходи тваринного походження, промислові та сільськогосподарські тверді відходи. Основними характеристиками недеревної біомаси є високий рівень забрудненості, висока вологість, велика пустотність, низька щільність та теплота згоряння.

Серед різних властивостей вихідної біомаси вміст вологи має значний вплив на утворення біовугілля. Волога в біомасі може існувати в різних формах, таких як рідка вода, водяна пара або бути адсорбованою в порах біомаси [13–18].

Високий вміст вологи в біомасі (> 30%) значною мірою пригнічує утворення вугілля та збільшує кількість енергії, необхідної для досягнення температури піролізу [19–21].

Низький вміст вологи в біомасі (< 30%) є більш прийнятним для утворення біовугілля, оскільки дає змогу значно знизити витрати теплової енергії та скоротити тривалість процесу піролізу, що робить виробництво біовугілля економічно вигіднішим порівняно з біомасою з високим вмістом вологи.

Проте ключовим чинником, що впливає на елементний склад та характеристики біовугілля, є тип біомаси.

Звичайні термохімічні методи, що використовуються для виробництва біовугілля, включають піроліз, гідротермічну карбонізацію, газифікацію та торрефікацію [22; 23].

Піролізом називається процес термічного розкладу органічних матеріалів у безкисневому середовищі за температури 250–900°C [21–26]. Цей процес є альтернативною стратегією перетворення біомаси на такі продукти, як біовугілля, синтез-газ та біонафта.

У ході процесу лігноцелюлозні компоненти, такі як целюлоза, геміцелюлоза і лігнін, проходять реакційні перетворення – деполімеризацію, фрагментацію та зшивання за певних температур, у результаті чого утворюються продукти у твердому, рідкому та газоподібному стані.

Тверді та рідкі продукти включають вугілля та біонафту, тоді як газоподібні продукти містять діоксид вуглецю, оксид вуглецю, водень, а також синтез-газ. Вихід біовугілля в процесі піролізу залежить від типу та властивостей використаної біомаси. Температура є ключовим чинником, що визначає ефективність отриманого продукту [11–16].

Гідротермічна карбонізація вважається економічно ефективним методом виробництва біовугілля, оскільки процес може проводитися за низької температури (близько 180–250°C). У ході процесу біомаса змішується з водою та поміщається у закритий реактор. Продукт, отриманий за допомогою гідротермічного процесу, називається гідровугіллям [9–12].

Газифікація – це термохімічний метод розкладу вуглецевмісного матеріалу на газоподібні продукти, тобто синтез-газ, що містить CO, CO₂, CH₄, H₂ та сліди вуглеводнів, у присутності газифікуючих агентів, таких як кисень, повітря, водяна пара тощо, і за високої температури [9–12]. Основним продуктом цього процесу є синтез-газ, тоді як вугілля вважається побічним продуктом із меншим виходом.

Торрефікація є новою технологією виробництва біовугілля. Вона використовує низьку швидкість нагріву, тому її також називають м'яким піролізом. Кисень, волога та вуглекислий газ, присутні в біомасі, видаляються за допомогою інертної атмосфери без доступу кисню за температури близько 300°C із використанням різних процесів розкладу [9–14]. Процес торрефікації змінює властивості біомаси, такі як розмір частинок, вологість, площа поверхні, швидкість нагріву, щільність.

Серед усіх цих методів піроліз є найчастіше використовуваним способом отримання біовугілля.

Біовугілля виробляється з різною метою, залежно від його властивостей. Його характеристики можуть змінюватися для виконання певних функцій або підготовки до конкретного застосування [24–28].

Загалом біовугілля – це продукт, який ва-ряється від частково вуглефікованої біомаси до повністю жароміцного вуглецю, з істотною неоднорідністю фізико-хімічних властивостей, що переважно зумовлена видом біомаси, параметрами виробництва та численними методами обробки.

Окрім того, на властивості біовугілля суттєво впливають тип біомаси, умови виробництва, зокрема тривалість перебування, температурний режим та тип реактора [24–28].

Термохімічні процеси виробництва біовугілля показано на рис. 1.

Найбільш значущим параметром, що впливає на характеристики біовугілля, є температура виробництва [19–21].

На вибір процесу виробництва біовугілля впливає економічна доцільність порівняно з максимізацією кількості та властивостей біовугілля [19–21].

МЕТА

Аналіз фізичних і хімічних властивостей біовугілля у вибраних наукових дослідженнях підкреслює важливість подальшого вивчення для вирішення проблем, пов'язаних зі змінністю сировини, умовами піролізу та довгостроковою поведінкою у різних умовах навколишнього середовища.

Всеосяжна та критична оцінка властивостей біовугілля, їх взаємодії та екологічних наслідків є необхідною для повного використання потенційних переваг цього матеріалу.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Біовугілля має різноманітні фізичні та хімічні властивості, що робить його універсальною речовиною для різних сфер застосування. Його структура забезпечує достатню площу поверхні для адсорбції та мікробної активності, впливає на водоутримувальну здатність, стабільність та стійкість до розкладання, що сприяє його довгостроковому потенціалу фіксації вуглецю у ґрунті [15–19].

Хімічно біовугілля переважно складається з вуглецю, а також містить різну кількість кисню, водню, азоту та інших елементів, що надходять із біомаси-сировини. Ці елементи впливають на реакційну здатність, уміст поживних речовин та абсорбційні властивості.

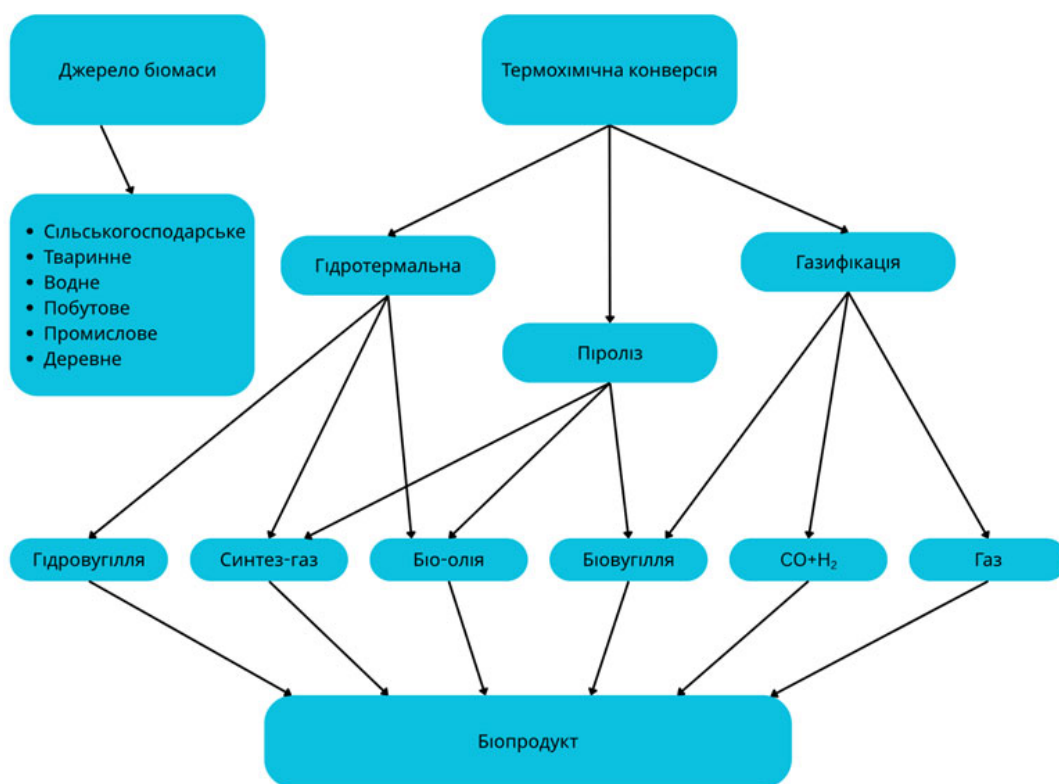


Рис. 1. Термохімічний процес виробництва біовугілля

Функціональні групи на поверхні біовугілля, такі як гідроксильні, карбоксильні та фенольні, покращують утримання поживних речовин і сприяють хімічним реакціям у навколишньому середовищі.

Окрім того, властивості біовугілля варіюються залежно від виробничого процесу, типу сировини та умов піролізу, включаючи площу поверхні, рН, катіонообмінну ємність, об'ємну щільність та елементний склад [11–20].

Ці чинники визначають його придатність для конкретних застосувань, таких як покращення ґрунтів, фільтрація води, зв'язування вуглецю та використання як каталізатора або адсорбенту в різних галузях промисловості.

У дослідженнях [16–19] вивчено фізичні та хімічні характеристики біовугілля, отриманого з деревних відходів. Їхня робота надала цінну інформацію щодо таких властивостей, як рН, площа поверхні та елементний склад. Типові властивості біовугілля наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Типові властивості біовугілля

Показник	Значення
Хімічні	
рН	6,8–9,5
Органічні домішки, %	30–35
C, %	60–65
H, %	3,45–3,75
N, %	0,1–0,24
P, %	0,15–0,22
Площа поверхні, м ² /г	36,7–907,4
K, %	0,20–0,87
Ca, %	5,3–6,0
Фізичні	
Вологість, %	3,5–4,0
Уміст золи, %	1,4–28
Насипна щільність, г/см ³	0,3–0,5

Проведено дослідження [14–19] впливу температури піролізу на властивості біовугілля, отриманого з осаду стічних вод. Визначено, що вплив температури на площу поверхні, пористість і вміст різних речовин у біовугіллі можуть бути значними і є важливими чинниками під час виробництва біовугілля. Своєю чергою, збільшена площа поверхні може покращити адсорбційну здатність і реакційну здатність біовугілля.

Із підвищенням температури піролізу змінюються властивості біовугілля та його поверхня. Це пояснюється тим, що вищі температури сприяють виділенню летких органічних речовин, залишаючи після себе більш пористу структуру з більшою площею поверхні. Вищі

температури піролізу призводять до формування більш пористої структури всередині біовугілля.

На вміст поживних речовин у біовугіллі може впливати температура піролізу. Підвищені температури можуть спричинити втрату летких органічних сполук.

Довгострокові дослідження з оцінки стабільності та ефективності біовугілля, отриманого з осаду стічних вод, були проведені [6–11]. Результати надали широкий огляд властивостей біовугілля, зокрема пористості, площі поверхні, елементного складу та термічної стабільності. Особлива увага приділялася старінню біовугілля та його взаємодії з ґрунтовими мікроорганізмами.

Дослідники [9–16] підкреслили значення фізико-хімічних властивостей біовугілля, отриманого зі стічних вод, ілового компосту та рослинної біомаси. Їхні дослідження акцентували важливість контролю температури під час визначення змочуваності біовугілля та її впливу на утримання води й гідрологічні характеристики.

Однак необхідні подальші дослідження для з'ясування основних механізмів і відповідної оптимізації процесів виробництва біовугілля з метою його ефективного використання в різних галузях. Схему виробництва та застосування біовугілля наведено на рис. 2.

Х. Лі та ін. [16–20] представили всебічне обговорення застосування біовугілля в індустрії сталого будівництва. У статті надано огляд властивостей біовугілля та його потенційного використання в будівельних матеріалах, підкреслюються екологічні переваги, такі як зниження викидів парникових газів під час використання біовугілля. Наголошуючи на важливості властивостей біоچارу залежно від сировини, у розділі підкреслюється необхідність забезпечення його ефективності та стійкості в будівельній практиці.

У дорожній галузі асфальтобетон є найчастіше використовуваним матеріалом для будівництва автомобільних доріг. Асфальтові суміші, що складаються з асфальтового в'язучого та заповнювача, мають як позитивні, так і негативні властивості. Для покращення характеристик асфальтових сумішей, таких як стійкість до колієутворення, зношування та довговічність, робилися спроби використання матеріалів на основі вуглецю (наприклад, вугільна сажа, вуглецеве волокно та вуглецеві нанотрубки) [21–23].

Однак досить висока вартість вуглецевих матеріалів і обмежені можливості їх удосконалення стримували широкомасштабне застосування.



Рис. 2. Схема виробництва та застосування біовугілля

Деякі дослідники почали використовувати біовугілля як економічно вигідний вуглецевий модифікатор для покращення властивостей асфальтових в'язучих і сумішей, таких як довговічність, температурна чутливість і втомна міцність.

Біовугілля виявилось більш ефективним у підвищенні температурної чутливості та стійкості асфальтових в'язучих до колієутворення, ніж вугільна сажа або вуглецеве волокно [23–26].

Біовугілля з розміром частинок менше ніж 75 мкм може бути переважним модифікатором асфальтового в'язучого для досягнення задовільної в'язкості та стійкості до низькотемпературного розтріскування. Старіння асфальтового в'язучого може призводити до тріщиноутворення та втоми. Водночас старіння також сприяє підвищенню в'язкості, впливаючи на жорсткість асфальтових в'язучих і сумішей [21–24]. Тому зріс інтерес до підвищення стійкості асфальту до старіння та температурної чутливості.

Проведені дослідження [11–17] довели, що піролізне біовугілля може, насамперед, покращити стійкість асфальтових в'язучих до старіння за рахунок пом'якшення окисного старіння компонентів в'язучого, а не зменшення випаровування легких фракцій.

Окрім того, піролізне біовугілля, яке має вуглець як основний компонент, може захищати поверхню асфальту від ультрафіолетового випромінювання, запобігати фотоокисному старінню та покращувати високотемпературну стабільність асфальту.

У дослідженнях [11–14] біовугілля, отримане зі стебел соломки з розміром частинок 89 мкм, використовувалося в суміші з асфальтовим в'язучим у різних концентраціях (5%, 7,5%, 10%, 12,5% та 15%). Додавання біовугілля до в'язучого підвищило його стійкість до колієутворення за високих температур. Проте, на жаль, низькотемпературні характеристики не покращилися.

У дослідженнях [23–26] в'язуче модифікували біовугіллями, отриманим у результаті піролізу деревних відходів кипарису. Біовугілля мало розмір частинок, які проходили через сито 75 мкм, і змішувалося з в'язучим у концентраціях 2%, 4%, 6% і 8% протягом 60 хв за температури 135°C і швидкості змішування 2000 об/хв. Дослідники провели реологічні та хімічні випробування асфальту і виявили, що додавання біовугілля покращує високотемпературні характеристики та стійкість до старіння.

У дослідженнях [20–22] для отримання біовугілля з рисового лушпиння була

застосована технологія повільного піролізу. Розмір частинок – 75 мкм для модифікації асфальтового в'язучого у дозах 5% і 10%. Результати випробувань в'язучого, модифікованого біовугіллям, показали підвищення жорсткості сумішей, зменшення глибини колії та чутливості до вологості. Однак зі зростанням умісту біовугілля стійкість до вологого руйнування знижувалася, тоді як тріщиностійкість асфальтобетонних сумішей підвищувалася.

У дослідженнях [22–28] вивчався вплив біовугілля із соломи на характеристики асфальтового в'язучого. Біовугілля змішували з в'язучим у різних пропорціях (2–12% за масою) і визначали фізичні та реологічні властивості. Результати показали, що вміст біовугілля на рівні 6% є оптимальним для покращення характеристик асфальтового в'язучого, причому біовугілля покращує властивості за високих температур, але знижує їх за низьких.

С. Сюн та ін. [25–28] досліджували ефективність біовугілля, отриманого з лущиння насіння. Біовугілля мало розмір частинок, що проходили через стандартне сито 150 мкм, і використовувалося для модифікації асфальтового в'язучого. Змішування з в'язучим проводилося в різних пропорціях (5–20% за масою). Результати показали, що збільшення вмісту біовугілля покращує в'язкість, стійкість до старіння та колієутворення в асфальтових в'язучих.

Побічним продуктом, що утворюється під час піролізу біовугілля, є біонафта. Вона також може застосовуватися як омолоджуючий засіб для старого асфальту [20–25]. Проведені дослідження підтвердили можливість комбінованого використання біовугілля та біонафти для виготовлення екологічно чистого асфальту.

Для підвищення ефективності та поєднання позитивних властивостей різних видів біовугілля, що впливають на покращення характеристик асфальтової суміші, вчені проводили дослідження з комбінаціями біовугілля.

У дослідженнях [22–25] для модифікації асфальтового в'язучого використовували два види біовугілля – із шкаралупи волоського горіха та абрикосових кісточок у різних концентраціях (5%, 10% і 15% від маси в'язучого) за температури 180°C. Результати показали, що біовугілля підвищило жорсткість асфальтового в'язучого за високих температур.

Однак у цих дослідженнях оцінювалися лише традиційні та реологічні властивості в'язучих, а інформація про властивості асфальтових сумішей була відсутня.

Також для оптимізації характеристик асфальтових сумішей можливе використання комбінацій біовугілля з переробленими промисловими відходами.

У дослідженнях [18–22] асфальтове в'язуче та суміш гумової крихти були модифіковані біовугіллям на основі побутових відходів, отриманих у процесі гідротермального зрідження. Біовугілля додавали у кількості 8% від маси асфальтового в'язучого. Було оцінено реологічні властивості в'язучого, модифікованого біовугіллям, із подальшими випробуваннями на стійкість до утворення колії, втоми та вологозахисту. Результати показали, що біовугілля підвищує стійкість асфальтової суміші до руйнування до і після старіння, а також її стійкість до колієутворення та пошкодження від вологості з часом.

Х. Шебиль та ін. [26–28] модифікували асфальтове в'язуче сумішшю біовугілля та наноглини. Біовугілля було отримане з побутових відходів, а суміш створювалася шляхом об'єднання біовугілля та наноглини у різних співвідношеннях (2%, 5% і 10% за масою асфальтового в'язучого для біовугілля та 2% і 4% – для наноглини). Було перевірено реологічні властивості, стійкість до старіння та термостійкість модифікованих сумішей. Дослідження показало, що включення біовугілля покращує термічні властивості та стійкість до старіння асфальтового в'язучого, а також сприяє рівномірному розподілу наноглини у в'язучій речовині.

Аналогічно, Ю. Чжан та ін. [22–27] вивчали вплив 3% і 6% біовугілля з побутових відходів на властивості як звичайного, так і модифікованого асфальтового в'язучого. Згідно з результатами, додавання біовугілля покращує в'язкоеластичні властивості та стійкість асфальтових в'язучих до старіння.

Іншим типом біовугілля, який може бути використаний у дорожньо-будівельній галузі, є гідровугілля.

Гідровугілля, виготовлене шляхом гідротермальної карбонізації біомаси, також демонструє добру сумісність з асфальтом завдяки мікропорам, пустотам і великій кількості функціональних груп на поверхні. Високотемпературні характеристики асфальту значно покращуються за додавання гідровугілля. Оптимальна доза гідровугілля становила 6% за масою, а температура проникнення та розм'якшення досягала 31,7 (0,1 мм) [22–26]. Однак додавання гідровугілля знижувало зручність укладання

асфальту за низьких температур, що потребує подальшого вивчення та вдосконалення шляхом упровадження спеціальних добавок до гідровугілля.

ВИСНОВКИ

На завершення можна сказати, що розглянуті дослідження підкреслюють значний потенціал біовугілля у сталому будівництві.

Біовугілля отримує визнання завдяки своєму потенціалу відігравати ключову роль у просуванні практик сталого будівництва. Унікальні властивості роблять його перспективним матеріалом для різноманітного застосування в будівельній галузі, що відповідає цілям сталого розвитку.

Окрім того, використання біовугілля сприяє зниженню викидів вуглекислого газу, що робить його екологічно чистою добавкою для будівельних застосувань. Дослідження підкреслюють потенціал біовугілля у підвищенні стійкості та ефективності різних будівельних матеріалів.

Такі властивості, як підвищена механічна міцність, зменшення усадки та покращена здатність до адсорбції забруднюючих речовин, відкривають можливості для створення екологічно безпечних будівельних матеріалів. Водночас необхідні подальші дослідження для вивчення процесів старіння, довгострокової довговічності, економічної ефективності та масштабованості продуктів на основі біовугілля.

Вирішення цих проблем дасть змогу біовугіллю стати справді цінним ресурсом у пошуках сталих будівельних рішень.

Використання біовугілля в асфальтобетоні – це інноваційний підхід із багатообіцяючим потенціалом.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Awasthi M.K., Wang M., Chen H., Wang Q., Zhao J., Ren X., Li D.-S., Awasthi S.K., Shen F., Li R., Zhang Z. Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 224. P. 428–438. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.11.105.
- [2] Bakraoui M., Karouach F., Ouhammou B., Aggour M., Essamri A., El Bari H. Biogas production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: optimal and mesophilic conditions. *Biotechnology Reports*. 2020. Vol. 25. Article e00402. DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00402.
- [3] Bergman P.C.A., Boersma A.R., Zwart R.W.R., Kiel J.H.A. Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations; Report No. ECN-C--05-013. Petten : Energy Research Centre of The Netherlands (ECN), 2005. 71 p.
- [4] Brewer C.E., Chuang V.J., Masiello C.A., Gonnermann H., Gao X., Dugan B., Driver L.E., Panzacchi P.,

Zygourakis K., Davies C.A. New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*. 2014. Vol. 66. P. 176–185. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.03.059.

[5] El-Naggar A., Lee S.S., Rinklebe J., Farooq M., Song H., Sarmah A.K., Zimmerman A.R., Ahmad M., Shaheen S.M., Ok Y.S. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. *Geoderma*. 2019. Vol. 337. P. 536–554. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.034.

[6] Fathianpour A., Taheriyoun M., Soleimani M. Lead and zinc stabilization of soil using sewage sludge biochar: optimization through response surface methodology. *Clean – Soil, Air, Water*. 2018. Vol. 46. No. 10. Article 1700429. DOI: 10.1002/clen.201700429.

[7] Fellet G., Marmiroli M., Marchiol L. Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Science of the Total Environment*. 2014. Vols. 468–469. P. 598–608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.072.

[8] Gomez-Eyles J.L., Sizmur T., Collins C.D., Hodson M.E. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159. P. 616–622. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.09.037.

[9] Gong X., Huang D., Liu Y., Zeng G., Chen S., Wang R., Xu P., Cheng M., Zhang C., Xue W. Biochar facilitated the phytoremediation of cadmium contaminated sediments: metal behavior, plant toxicity, and microbial activity. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 666. P. 1126–1133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.281.

[10] Hu X., Xu J., Wu M., Xing J., Bi W., Wang K. та ін. Effects of biomass prepyrolysis and pyrolysis temperature on magnetic biochar properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. Vol. 127. P. 196–202. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.09.003.

[11] Jahirul M.I., Rasul M.G., Chowdhury A.A., Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis – a technological review. *Energies*. 2012. Vol. 5. P. 4952–5001. DOI: 10.3390/en5124952.

[12] Kastner J.R., Miller J., Geller D.P., Locklin J., Keith L.H., Johnson T. Catalytic esterification of fatty acids using solid acid catalysts generated from biochar and activated carbon. *Catalysis Today*. 2012. Vol. 190. P. 122–132. DOI: 10.1016/j.cattod.2012.02.006.

[13] Lehmann J. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J., Joseph S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. London : Earthscan, 2009. P. 1–12.

[14] Li H., Dong X., da Silva E.B., de Oliveira L.M., Chen Y., Ma L.Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*. 2017. Vol. 178. P. 466–478. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.072.

[15] Lin Y., Ma X., Peng X., Yu Z., Fang S., Lin Y. та ін. Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. *Fuel*. 2016. Vol. 181. P. 905–915. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.05.031.

[16] Luo L., Wang G., Shi G., Zhang M., Zhang J., He J. та ін. The characterization of biochars derived from

rice straw and swine manure, and their potential and risk in N and P removal from water. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 245. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.017.

[17] Nag S.K., Kookana R., Smith L., Krull E., Macdonald L.M., Gill G. Poorefficacy of herbicides in biochar-amended soils as affected by their chemistry and mode of action. *Chemosphere*. 2011. Vol. 84. P. 1572–1577. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.05.052.

[18] Pang S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology Advances*. 2019. Vol. 37. P. 589–597. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2019.03.002.

[19] Qian T.T., Wu P., Qin Q.-P., Huang Y.-N., Wang Y.-J., Zhou D.-M. Screening of wheat straw biochars for the remediation of soils polluted with Zn(II) and Cd(II). *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 362. P. 311–317. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.019.

[20] Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. No. 5. P. 2262–2289. DOI: 10.1016/j.rser.2011.02.015.

[21] Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis – a review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. P. 1081–1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193.

[22] Sohi S.P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. 2010. Vol. 105. P. 47–82. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)05002-9.

[23] Spokas K.A., Cantrell K.B., Novak J.M., Archer D.W., Ippolito J.A., Collins H.P. та ін. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*. 2012. Vol. 41. P. 973–989. DOI: 10.2134/jeq2011.0069.

[24] Wei J., Tu C., Yuan G., Liu Y., Bi D., Xiao L. та ін. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 251. P. 56–65. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.04.069.

[25] Xun S., Yu I.K.M., Cao L., Tsang D.C.W., Zhang S., Ok Y.S. A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel production, and pollution control. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 246. P. 254–270. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.030.

[26] Yao Y., Gao B., Inyang M., Zimmerman A.R., Cao X.D., Pullammanappallil P., Yang L.Y. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: characterization and phosphate removal potential. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. P. 6273–6278. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.001.

[27] Zhang Y., Sun H., Min L., Ren C. Biochars change the sorption and degradation of thiacloprid in soil: insights into chemical and biological mechanisms. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 236. P. 158–167. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.01.043.

[28] Zhou D., Orlov A., Wang Y., Zhang Y., Zhao J. A review of biochar-based composites for wastewater treatment. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 265. Article 114617. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114617.

REFERENCES

[1] Awasthi, M.K., Wang, M., Chen, H., Wang, Q., Zhao, J., Ren, X., Li, D.-S., Awasthi, S.K., Shen, F., Li, R., & Zhang, Z. (2017). Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 224, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.105> [in English].

[2] Bakraoui, M., Karouach, F., Ouhammou, B., Aggour, M., Essamri, A., & El Bari, H. (2020). Biogas production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: Optimal and mesophilic conditions. *Biotechnology Reports*, 25, e00402. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00402> [in English].

[3] Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R., & Kiel, J.H.A. (2005). *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations* (Report No. ECN-C--05-013). Energy Research Centre of The Netherlands [in English].

[4] Brewer, C.E., Chuang, V.J., Masiello, C.A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L.E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C.A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059> [in English].

[5] El-Naggar, A., Lee, S.S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A.K., Zimmerman, A.R., Ahmad, M., Shaheen, S.M., & Ok, Y.S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536–554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034> [in English].

[6] Fathianpour, A., Taheriyoun, M., & Soleimani, M. (2018). Lead and zinc stabilization of soil using sewage sludge biochar: Optimization through response surface methodology. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 46(10), 1700429. <https://doi.org/10.1002/clen.201700429> [in English].

[7] Fellet, G., Marmiroli, M., & Marchiol, L. (2014). Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Science of the Total Environment*, 468–469, 598–608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.072> [in English].

[8] Gomez-Eyles, J.L., Sizmur, T., Collins, C.D., & Hodson, M.E. (2011). Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 159, 616–622. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.037> [in English].

[9] Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Zeng, G., Chen, S., Wang, R., Xu, P., Cheng, M., Zhang, C., & Xue, W. (2019). Biochar facilitated the phytoremediation of cadmium contaminated sediments: Metal behavior, plant toxicity, and microbial activity. *Science of the Total Environment*, 666, 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.281> [in English].

[10] Hu, X., Xu, J., Wu, M., Xing, J., Bi, W., Wang, K., ... Liu, X. (2017). Effects of biomass prepyrolysis and pyrolysis temperature on magnetic biochar properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.09.003> [in English].

- [11] Jahirul, M.I., Rasul, M.G., Chowdhury, A.A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production through biomass pyrolysis – A technological review. *Energies*, 5(12), 4952–5001. <https://doi.org/10.3390/en5124952> [in English].
- [12] Kastner, J.R., Miller, J., Geller, D.P., Locklin, J., Keith, L.H., & Johnson, T. (2012). Catalytic esterification of fatty acids using solid acid catalysts generated from biochar and activated carbon. *Catalysis Today*, 190, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.02.006> [in English].
- [13] Lehmann, J. (2009). Biochar for environmental management: An introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (pp. 1–12). Earthscan [in English].
- [14] Li, H., Dong, X., da Silva, E.B., de Oliveira, L.M., Chen, Y., & Ma, L.Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466–478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072> [in English].
- [15] Lin, Y., Ma, X., Peng, X., Yu, Z., Fang, S., Lin, Y., & Fan, Y. (2016). Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. *Fuel*, 181, 905–915. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.031> [in English].
- [16] Luo, L., Wang, G., Shi, G., Zhang, M., Zhang, J., He, J., ... Deng, O. (2019). The characterization of biochars derived from rice straw and swine manure, and their potential and risk in N and P removal from water. *Journal of Environmental Management*, 245, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.017> [in English].
- [17] Nag, S.K., Kookana, R., Smith, L., Krull, E., Macdonald, L.M., & Gill, G. (2011). Poor efficacy of herbicides in biochar-amended soils as affected by their chemistry and mode of action. *Chemosphere*, 84(11), 1572–1577. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.052> [in English].
- [18] Pang, S. (2019). Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology Advances*, 37(4), 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.03.002> [in English].
- [19] Qian, T.T., Wu, P., Qin, Q.-P., Huang, Y.-N., Wang, Y.-J., & Zhou, D.-M. (2019). Screening of wheat straw biochars for the remediation of soils polluted with Zn(II) and Cd(II). *Journal of Hazardous Materials*, 362, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.019> [in English].
- [20] Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015> [in English].
- [21] Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis – A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081–1096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193> [in English].
- [22] Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9) [in English].
- [23] Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Archer, D.W., Ippolito, J.A., Collins, H.P., ... Nichols, K.A. (2012). Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41, 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069> [in English].
- [24] Wei, J., Tu, C., Yuan, G., Liu, Y., Bi, D., Xiao, L., ... Zhang, X. (2019). Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*, 251, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.069> [in English].
- [25] Xiong, X., Yu, I.K.M., Cao, L., Tsang, D.C.W., Zhang, S., & Ok, Y.S. (2017). A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel production, and pollution control. *Bioresource Technology*, 246, 254–270. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.030> [in English].
- [26] Yao, Y., Gao, B., Inyang, M., Zimmerman, A.R., Cao, X.D., Pullammanappallil, P., & Yang, L.Y. (2011). Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: Characterization and phosphate removal potential. *Bioresource Technology*, 102(10), 6273–6278. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.001> [in English].
- [27] Zhang, P., Sun, H., Min, L., & Ren, C. (2018). Biochars change the sorption and degradation of thiacloprid in soil: Insights into chemical and biological mechanisms. *Environmental Pollution*, 236, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.043> [in English].
- [28] Zhou, D., Orlov, A., Wang, Y., Zhang, Y., & Zhao, J. (2020). A review of biochar-based composites for wastewater treatment. *Environmental Pollution*, 265, 114617. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114617> [in English].

ABSTRACT**Krayushkina K., Bondarchuk V. Analysis of the Possibility of Using Biochar in Asphalt Concrete**

Purpose. The purpose of this study is to investigate the impact of biochar, derived from various types of plant biomass, on the physical and mechanical properties of asphalt concrete mixtures. The goal is to enhance the ecological sustainability and operational performance of pavement materials in road construction.

Methodology. The study involved a comparative analysis of the properties of biochar produced by pyrolysis of different biomass sources. Laboratory samples of asphalt mixtures were prepared with partial replacement of mineral filler by biochar (up to 50% by weight). These samples underwent a series of physical, chemical, and mechanical tests to evaluate their strength, moisture resistance, temperature sensitivity, and adhesion properties.

Results. The findings demonstrate that adding biochar in the range of 40–50% by weight of the mineral filler improves asphalt mixture strength, reduces water saturation, enhances resistance to thermal aging, and lowers the mixture's placement temperature – resulting in energy savings. The integration of biochar leads to a more environmentally friendly and durable pavement structure.

Scientific novelty. This research systematizes, for the first time, the relationship between biochar characteristics (particle size, biomass type, moisture content) and asphalt concrete performance. It provides scientific justification for the partial replacement of conventional mineral filler with biochar without compromising the technical properties of asphalt mixtures.

Practical relevance. The results can be implemented in the development of eco-efficient road surfaces with improved durability, moisture resistance, and aging stability. Additionally, this approach contributes to carbon footprint reduction and the effective utilization of organic waste in construction practices.

Keywords: biochar, asphalt concrete, road construction, pyrolysis, ecological efficiency, carbon-based modifiers.

AUTHOR'S NOTE:

Krayushkina Kateryna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: ekrayushkina15@ukr.net, orcid: 0000-0001-5809-4300.

Bondarchuk Vadym, Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: bondar0071312@gmail.com, orcid: 0009-0007-8864-6584.

Стаття подана до редакції 30.05.2025