

ВИКОРИСТАННЯ БІОМАСИ ЯК ЧИННИК ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОТЕЛЕНЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ**А. О. Правосеров, аспірант***Національний технічний університет України «Київський політехнічний*<https://orcid.org/0009-0009-7123-3059>*E-mail: merrlin@ukr.net***К. О. Романова, кандидат технічних наук, доцент***Національний технічний університет України «Київський політехнічний**інститут імені Ігоря Сікорського»*<https://orcid.org/0000-0001-9738-3383>

Анотація. *Порушення функціонування енергетичної інфраструктури в Україні в умовах воєнного стану загострює проблему забезпечення надійного теплопостачання. Залежність котелень від природного газу знижує їхню стійкість до кризових впливів, що зумовлює необхідність переходу до альтернативних і локально доступних джерел енергії, зокрема біомаси.*

Метою статті є оцінка потенціалу використання біомаси для підвищення енергоекологічної ефективності котелень і забезпечення їхньої енергетичної стійкості. Для досягнення поставленої мети увагу зосереджено на виявленні ключових характеристик біопалив, оцінюванні їх впливу на ефективність роботи котелень, а також обґрунтуванні доцільності впровадження біоенергетичних рішень з урахуванням міжнародного досвіду.

У роботі використано порівняльний аналіз характеристик природного газу та різних видів біомаси, системний підхід до розгляду котельні як інтегрованої енерготехнологічної системи, розрахункові методи оцінювання теплотехнічних і економічних показників, а також елементи експериментального аналізу складу паливних матеріалів і узагальнення зарубіжного досвіду.

Встановлено, що використання біомаси сприяє підвищенню енергетичної автономності котелень і зниженню собівартості теплової енергії порівняно з природним газом. Виявлено, що ефективність функціонування біопаливних котелень визначається узгодженістю їхніх технологічних елементів і врахуванням властивостей палива. Обґрунтовано доцільність використання деревних пелет і торрефікованої біомаси для котелень середньої потужності, тоді як агробіомаса потребує врахування корозійних і шлакоутворювальних ризиків. Показано можливість адаптації європейських моделей біоенергетики до вітчизняних умов.

Використання біомаси є ефективним напрямом підвищення енергоекологічної ефективності та стійкості систем теплопостачання в умовах воєнного стану. Перехід на біопаливо забезпечує диверсифікацію джерел енергії, зниження залежності від імпортованих ресурсів і розвиток локальних паливних ринків. Реалізація цього підходу потребує комплексного врахування технічних, економічних і ресурсних чинників.

Ключові слова: *біомаса, котельні, енергетична стійкість, військовий стан, відновлювальна енергетика, біопаливо, енергетична незалежність, системні відключення, теплопостачання*

Вступ. У цій роботі розглянуто потенціал використання біомаси як альтернативного енергоносія для підвищення енергетичної стійкості котелень в умовах воєнного стану та системних відключень електроенергії. Підвищення енергоекологічної ефективності індивідуальних житлових будинків [1] є важливим та актуальним завданням з позиції забезпечення енергетичної незалежності та зменшення негативного впливу енергетики на довкілля. Особливої актуальності це питання набуває для регіонів України з розвиненим аграрним та лісовим потенціалом [2], зокрема для Хмельницької області, де існують сприятливі умови для використання біомаси як альтернативного джерела енергії. До основних видів біомаси, що застосовуються у системах індивідуального опалення приватних будинків, належать деревні пелети, паливні брикети, дрова та аграрні відходи [3]. Україна має достатній ресурсний потенціал виробництва біомаси [4] для повного заміщення газового

опалення в приватному секторі, однак реалізувати його заважають три системні бар'єри: відсутність субсидій на обладнання, низькі штучно занижені тарифи на газ та погана організація ринку біопалива. Аналіз досвіду чотирьох провідних країн [5] ЄС дозволяє зрозуміти, яким шляхом пройшли ті, хто вже вирішив цю задачу. Австрія, Швеція, Данія і Фінляндія об'єднані спільним підходом: держава не просто рекомендує біомасу, а створює умови, за яких відмова від газу стає економічно природним вибором. Субсидії на обладнання у розмірі 25–35%, вуглецеві податки, що роблять газ дорожчим, і жорсткі будівельні норми, що зменшують саму потребу в теплі, – ці три інструменти разом працюють як система, і жоден з них окремо не дає того ефекту, якого досягають всі три разом.

Огляд літературних джерел. Наукові джерела з проблематики переходу котелень на біомасу в умовах воєнних ризиків можна згрупувати у кілька взаємопов'язаних напрямів. По-перше, досліджується роль розподіленої генерації та резервування енергопостачання потужних котелень як елементу підвищення енергетичної стійкості в умовах військової агресії [6]. По-друге, значний масив робіт присвячено технічній модернізації котельних установок і підвищенню енергоекологічної ефективності теплообмінних систем, що визначає базові інженерні підходи до реконструкції та зниження втрат енергії [7]. По-третє, у фокусі перебувають екологічно-правові та адміністративно-правові аспекти функціонування енергетичного сектору під час воєнного стану, зокрема вимоги до екологічної безпеки та державного контролю [8]. По-четверте, активно розвивається напрям автоматизації та дистанційного моніторингу котелень на біомасі, включно з архітектурою систем керування на вбудованих платформах [9]. Окремо аналізуються конструктивні рішення для підвищення ефективності вузлів подавання та завантаження біопалива, що напряму впливає на стабільність горіння й експлуатаційну надійність [10]. По-п'яте, поширюються методології інтегрованої оцінки ефективності (аналіз, підходи життєвого циклу системи), які дозволяють порівнювати сценарії за енергетичними та екологічними критеріями [11]. В українських прикладних дослідженнях також розглядаються показники енергоекологічної ефективності в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля», що є важливим для обґрунтування рішень на рівні громад [12]. З погляду сталого розвитку підкреслюється зв'язок між енергоефективністю, «зеленою» енергією та екологічною стійкістю як результатом управлінських рішень [13; 14]. Нарешті, фінансово-економічний блок охоплює бюджетні інструменти забезпечення фінансової стійкості територіальних громад та перспективи «зеленого» фінансування інфраструктурних трансформацій [15; 16]. Водночас узагальнення наведених підходів свідчить, що недостатньо опрацьованими залишаються питання швидкої конверсії існуючих котелень на біопаливо за дефіциту ресурсів, побудови стійких локальних ланцюгів постачання біопалива та комплексної оцінки соціально-економічних ефектів для муніципального сектору теплопостачання.

Метою дослідження є комплексний аналіз потенціалу використання біомаси для підвищення енергоекологічної ефективності котелень та забезпечення енергетичної стійкості систем теплопостачання в умовах системних енергетичних криз, спричинених військовим станом в Україні, передумови використання біомаси мають комплексний характер і формуються під впливом взаємопов'язаних кліматичних, енергетичних, ресурсних, технологічних та економічних факторів. Їх синергічна дія створює об'єктивне підґрунтя для інтеграції біоенергетичних рішень у систему теплопостачання, особливо в умовах підвищених ризиків енергетичної нестабільності та необхідності забезпечення енергоекологічної стійкості регіонів.

Матеріали і методи дослідження. Для досягнення мети дослідження було проведено комплексний аналіз потенціалу використання біомаси в системах теплопостачання середньої потужності (1–2 МВт). В якості об'єктів дослідження розглядалися котельні установки, що працюють на природному газі, деревних пелетах класу А1, агропелетах, деревній трісці та торрефікованій біомасі.

Методологічна база дослідження включала техніко-експлуатаційний аналіз котельних систем, оцінку фізико-хімічних властивостей палива, теплотехнічні розрахунки режимів

роботи котлів та порівняльний аналіз міжнародного досвіду впровадження біопаливних технологій у Данії, Фінляндії, Швеції та Австрії. Особлива увага приділялася системній оцінці інтегрованих контурів котельних установок, включаючи паливний, теплотехнічний і експлуатаційний компоненти, що дозволяє враховувати взаємозв'язок між характеристиками палива та ефективністю роботи системи в цілому.

Економічні аспекти досліджувалися через порівняння собівартості теплової енергії та ключових інвестиційних показників для різних видів палива. Експериментальна частина роботи включала лабораторне визначення складу палива, теплотворної здатності та агресивних компонентів, здатних впливати на конструкційні матеріали котлів. Узгоджене застосування цих методів дозволило забезпечити всебічну оцінку доцільності переходу на біомасу як альтернативний ресурс у вітчизняних умовах.

Результати досліджень та їх обговорення. Проведений аналіз показав, що використання біомаси в системах теплопостачання слід розглядати не лише як варіант паливозаміщення, а як один із практичних механізмів підвищення енергетичної стійкості котельні. Для таких систем визначальне значення мають не тільки теплотехнічні характеристики палива, а й можливість автономної роботи, адаптація обладнання до різних видів біомаси, стабільність подачі палива, керованість процесу горіння та здатність системи зберігати працездатність в умовах перебоїв енергопостачання. Саме тому в центрі дослідження перебуває не окремий котел, а цілісна функціональна схема, у якій поєднуються паливний бункер, система подачі біомаси, камера згорання, теплообмінний контур, буферна ємність, циркуляційний насос і кінцеві напрями використання виробленої енергії. Встановлено, що ефективність біопаливної котельні визначається узгодженістю всіх її елементів. Біомаса надходить у паливний бункер, далі через механізовану систему подачі транспортується до зони згорання, де тепла енергія передається теплоносію через теплообмінник. Після цього вироблене тепло може бути використане для обігріву приміщень, підготовки гарячої води або, за наявності відповідного технічного рішення, для супутньої генерації електроенергії. Окреме значення має буферна ємність, яка стабілізує роботу системи, зменшує нерівномірність теплового навантаження та підвищує надійність теплопостачання. Не менш важливими є вузли видалення золи, організація циркуляції теплоносія та забезпечення безперервності подачі палива, оскільки саме ці компоненти визначають експлуатаційну стійкість системи при тривалій роботі. Отримані результати свідчать, що перехід до використання біомаси потребує розгляду котельні як інтегрованої енерготехнологічної системи, у якій паливний, теплотехнічний і експлуатаційний контури взаємопов'язані. Такий підхід дає змогу оцінювати біомасу не ізольовано, а в межах повного циклу перетворення енергії – від завантаження палива до передачі тепла споживачеві. Схематично принцип роботи такої системи, включно з основними функціональними вузлами та потоками енергії, подано на рис. 1.

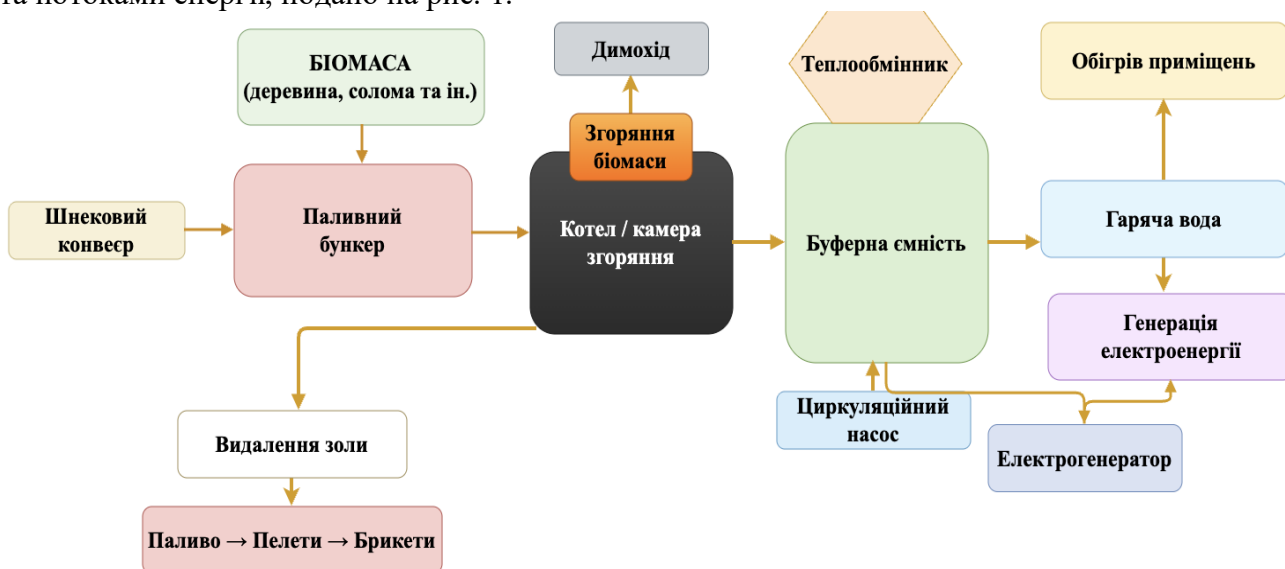


Рис. 1. Принцип роботи системи, що використовує біомасу як паливо

Джерело: розроблено авторами.

Проведене дослідження присвячене комплексному аналізу доцільності переходу котельних установок середньої потужності з природного газу на біопаливо – деревні пелети, агропелети, деревну тріску та торрефіковану біомасу. Отримані результати дозволяють сформулювати низку обґрунтованих висновків, кожен із яких спирається як на розрахункові дані, так і на підтверджений міжнародний досвід Данії, Фінляндії, Швеції та Австрії. Дослідження виникло на перетині кількох незалежних процесів, кожен із яких самостійно формував необхідність широкого аналізу паливних матеріалів для котельних установок у вітчизняних умовах.

Критичний стан системи теплопостачання України, що сформувався протягом десятиліть і різко загострився після 2022 року. Переважна більшість комунальних котелень країни була спроектована й побудована в радянський період під умови гарантованого й дешевого природного газу. Ці котельні є зношеними фізично – середній вік обладнання перевищує 25–30 років – і застарілими технологічно: їхні реальні показники ефективності суттєво нижчі за проектні, а залежність від єдиного виду палива робить їх вразливими до будь-яких перебоїв у постачанні газу. Пошкодження газової інфраструктури під час бойових дій і цілеспрямовані удари по енергетичних об'єктах перетворили цю хронічну вразливість на гостру кризу й поставили перед операторами систем теплопостачання питання диверсифікації паливної бази у формі негайної практичної необхідності, а не стратегічної перспективи. Україна щороку створює понад 21 мільйон тонн агровідходів, придатних для виробництва біопалива, – стебла соняшнику та кукурудзи, солому зернових, лушпиння соняшника, жом цукрового буряка, деревні відходи лісопереробки. Значна частина цієї сировини або спалюється безконтрольно в полях, або розкладається без будь-якого господарського використання. Одночасно існуюча мережа котелень споживає дорогий імпортований або ринково залежний природний газ. Ця очевидна невідповідність між наявним ресурсом і його використанням стала науковою проблемою, що потребує систематичного дослідження й обґрунтування

Фінляндія, Швеція, Данія, Австрія [13–16] пройшли через усі стадії впровадження: від початкових технічних помилок і матеріалознавчих проблем до відпрацьованих технологічних рішень і зрілих ринків біопалива, дозволяє уникнути повторення вже зроблених помилок і скоротити час переходу від концептуального обґрунтування до практичного впровадження. Відсутність систематичного порівняльного дослідження, що адаптувало б цей досвід до вітчизняних умов з урахуванням специфіки наявної сировинної бази, конструкційних матеріалів і регуляторного середовища, стала безпосереднім науковим обґрунтуванням теми. Визначення елементного складу паливних матеріалів біомаси встановлює фізичні властивості матеріалів, що розглядаються: природний газ (базовий варіант), деревні пелети класу А1, агропелети зі стебел соняшнику, деревна тріска та торрефікована біомаса, та є визначальними для проектування систем, за рахунок порівняння теплових якостей сировини, характеру продуктів згоряння та впливу палива як агресивного середовища конструкційних матеріалів котла. Експериментальна частина дослідження була реалізована на базі науково-дослідної лабораторії де було задіяно сучасне обладнання для аналізу властивостей матеріалів. Результати порівняння хімічного елементного складу природного газу, деревних пелет А1, агропелет із соняшнику, деревної тріски та торрефікованої біомаси наведено в табл. 1.

Таким чином, природний газ відрізняється від твердих видів біопалива насамперед відсутністю кисню у складі горючої маси й дуже низьким вмістом сірки та хлору, що робить його найменш агресивним щодо металевих поверхонь. Тверді біопалива містять значну частку кисню в складі органічної маси, що знижує їхню теплотворну здатність порівняно з газом, але є невід'ємною особливістю рослинного походження матеріалу. Особливу увагу привертає підвищений вміст хлору в агропелетах – до 0,15%, що є прямим наслідком накопичення хлоридів у рослинних тканинах і потребує врахування при виборі матеріалів

теплообмінних поверхонь, вивчення міжнародного досвіду впровадження біопаливних котелень є необхідною методологічною складовою дослідження, оскільки дозволяє верифікувати розрахункові показники через фактичні дані реалізованих проєктів, виявити типові технічні й організаційні проблеми, що виникають у процесі переходу, та оцінити довгострокові результати трансформації теплоенергетики в країнах із різними стартовими умовами й різними моделями впровадження.

1. Хімічний елементного складу речовин паливних матеріалів (% мас., на суху беззолну масу)

Елемент	Природний газ	Деревні пелети А1	Агропелети (соняшник)	Деревна тріска	Торрефікована біомаса
Вуглець С	72,5	50,1	47,3	49,2	55,8
Водень Н	23,0	6,1	5,8	6,0	5,2
Кисень О	–	42,8	43,1	43,5	37,6
Азот N	0,8	0,3	0,8	0,3	0,4
Сірка S	0,002	0,04	0,12	0,03	0,05
Хлор Cl	–	0,01	0,15	0,01	0,02
Зола А	–	0,6	2,7	1,0	1,0
Показник	Природний газ	Деревні пелети А1	Агропелети (соняшник)	Деревна тріска	Торрефікована біомаса
Агрегатний стан	Газ	Тверде тіло	Тверде тіло	Тверде тіло	Тверде тіло
Стандартний норматив якості	ДСТУ –	EN ISO 17225-2	EN ISO 17225-6	EN ISO 17225-4	CEN/TS 14961
Насипна густина, кг/м ³	0,73 (кг/м ³)	600–680	560–630	180–280	700–800
Гранулометрія	–	Ø 6–8 мм, L ≤40 мм	Ø 6–8 мм, L ≤40 мм	20–80 мм	Ø 6–8 мм
Вологість робоча, %	–	≤10	≤12	25–50	≤8
Зольність, % мас.	~0	≤1,5	≤5,5	≤2,0	≤2,0
Температура займання, °С	595	230–260	210–240	240–280	280–310
Температура плавлення золи, °С	–	>1 200	800–950	>1 100	>1 100
Гідрофільність	Н/д	Гідрофільна	Гідрофільна	Гідрофільна	Гідрофобна

Джерело: розроблено авторами.

Для порівняльного аналізу обрано чотири країни – Данію, Фінляндію, Швецію та Австрію, – кожна з яких представляє окрему модель переходу й демонструє різний набір рушійних чинників, технологічних рішень і досягнутих результатів. Разом ці чотири моделі утворюють повну картину можливих шляхів трансформації, з якої можна впровадити міжнародний досвід для вітчизняних умов. Технічний аспект данського досвіду є особливо цінним для дослідження, оскільки Данія однією з перших у великих масштабах зіткнулася з проблемами взаємодії біопалива з конструкційними матеріалами котельного обладнання. При масштабному спалюванні деревних пелет у котлах, спочатку спроектованих під вугілля, данські інженери виявили проблему утворення та накопичення золи на трубчастих теплообмінних поверхнях, зумовлену підвищеним вмістом лужних металів у деяких видах деревної сировини. Фінська модель принципово відрізняється від данської за своїм походженням: якщо в Данії перехід ініціювала держава у відповідь на зовнішній шок, то у

Фінляндії біоенергетика виросла целюлозно-паперової й лісопереробної галузей. Ліси вкривають 75% фінської території, а лісова промисловість генерує колосальні обсяги відходів – кору, тирсу та іншої сировини, утилізація яких через спалювання в котлах була єдиним практичним рішенням. Таким чином, фінська біоенергетика є найбільш органічним і найменш субсидованим прикладом серед розглянутих країн, що підтверджує її чисто ринкову ефективність за відсутності штучних стимулів. Шведська модель є унікальним прикладом ринкової трансформації теплоенергетики, де рушієм стала не пряма державна директива, а цінова політика, якщо в 1990-х роках системи централізованого теплопостачання Швеції майже повністю працювали на нафтопродуктах, то сьогодні понад 68% тепла в цих системах виробляється з деревної біомаси. Австрія займає унікальну нішу в міжнародному порівнянні: на відміну від трьох попередніх країн, де основу біоенергетики формують великі промислові й комунальні установки, австрійська модель є лідером саме у сфері малих і середніх автоматизованих котелень потужністю від 10 до 3 000 кВт – тобто в тому самому діапазоні, що розглядається в розрахунковій задачі. Саме австрійська промисловість фактично сформувала сучасний тип пелетного котла в його нинішньому вигляді: з автоматичною шнековою подачею, самоочишувальною топкою, керамічним пальником і мікропроцесорним управлінням. Ефективність роботи таких систем значною мірою визначається фізичними характеристиками паливних матеріалів, які впливають на стабільність подачі палива, швидкість займання, інтенсивність горіння та теплотехнічні показники котельного обладнання. Саме тому для подальшого аналізу було здійснено порівняння основних фізичних властивостей досліджуваних видів палива, результати якого наведено в табл. 2.

2. Фізичні властивості паливних матеріалів

Показник	Природний газ	Деревні пелети А1	Агропелети (сояшник)	Деревна тріска	Торрефікована біомаса
Агрегатний стан	Газ	Тверде тіло	Тверде тіло	Тверде тіло	Тверде тіло
Стандартний норматив якості	ДСТУ –	EN ISO 17225-2	EN ISO 17225-6	EN ISO 17225-4	CEN/TS 14961
Насипна густина, кг/м ³	0,73 (кг/м ³)	600–680	560–630	180–280	700–800
Гранулометрія	–	Ø 6–8 мм, L ≤40 мм	Ø 6–8 мм, L ≤40 мм	20–80 мм	Ø 6–8 мм
Вологість робоча, %	–	≤10	≤12	25–50	≤8
Зольність, % мас.	~0	≤1,5	≤5,5	≤2,0	≤2,0
Температура займання, °С	595	230–260	210–240	240–280	280–310
Температура плавлення золи, °С	–	>1 200	800–950	>1 100	>1 100
Гідрофільність	Н/д	Гідрофільна	Гідрофільна	Гідрофільна	Гідрофобна

Джерело: розроблено авторами.

Фізичні властивості паливних матеріалів є визначальними для проектування систем зберігання, транспортування та подачі палива в топку. Ключовою відмінністю деревних і торрефікованих пелет від деревної тріски є значно вища насипна густина – 600–800 кг/м³ проти 180–280 кг/м³, що безпосередньо визначає необхідний об'єм складських приміщень і можливість пневматичного завантаження. Торрефікована біомаса виділяється серед усіх твердих видів біопалива своєю гідрофобністю: на відміну від звичайних пелет і тріски, що активно поглинають вологу при зберіганні, вона зберігає свої теплотехнічні характеристики навіть при тривалому зберіганні у відкритих умовах. Низька температура плавлення золи агропелет – 800–950°C проти понад 1 200°C для деревних пелет – є критичним параметром, що сигналізує про ризик шлакоутворення на топкових поверхнях і вимагає відповідного конструктивного вирішення. Теплотехнічні характеристики є центральними параметрами

для розрахунку витрати палива й проектування режимів роботи котла. Пряме порівняння теплотворної здатності в традиційних одиницях МДж/кг є недостатнім для практичної оцінки: необхідно враховувати теплотворну здатність у перерахунку на одиницю об'єму складу, яка відображає реальну ємкість сховища для забезпечення заданої теплопродуктивності. Теплотехнічні характеристики є вихідними параметрами для розрахунку витрати палива й проектування режимів роботи котла, порівняння теплотворної здатності в традиційних одиницях МДж/кг є недостатнім для практичної оцінки, саме тому необхідно враховувати теплотворну здатність у перерахунку на одиницю об'єму складу, яка відображає реальну ємкість сховища для забезпечення заданої теплопродуктивності що потребує додаткових досліджень.

Зіставлення досвіду чотирьох країн із розрахунковими результатами задачі виявляє кілька системних закономірностей, що мають безпосереднє значення для якісної оцінки дослідження, найбільш оптимальними до вітчизняних умов за масштабом об'єктів і характером застосовуваних рішень є австрійський досвід, тоді як для підприємств із власними органічними відходами найбільш оптимальною є фінська модель замкненого циклу. Данська й шведська моделі є стратегічними орієнтирами для формування державної політики у сфері централізованого теплопостачання на біомасі в довгостроковій перспективі. Разом із тим практична доцільність упровадження того чи іншого виду палива визначається не лише організаційною моделлю чи наявністю сировини, а й його теплотехнічними характеристиками. Саме ці показники дають змогу оцінити енергетичну цінність паливних матеріалів, витрати на забезпечення необхідної теплопродуктивності, параметри процесу горіння та умови експлуатації котельного обладнання. З цією метою було проведено порівняння основних теплотехнічних характеристик природного газу, деревних пелет А1, агропелет, деревної тріски та торрефікованої біомаси, результати якого наведено в табл. 3.

3. Теплотехнічні характеристики паливних матеріалів

Показник	Природний газ	Деревні пелети А1	Агропелети (соняшник)	Деревна тріска	Торрефікована біомаса
Нижча теплотворна здатність Q_n , МДж/кг (МДж/м ³)	33,5 МДж/м ³	17,0 МДж/кг	15,5 МДж/кг	9,5 МДж/кг	20,5 МДж/кг
Q_n , кВт·год/кг (кВт·год/м ³)	9,31 кВт·год/м ³	4,72 кВт·год/кг	4,31 кВт·год/кг	2,64 кВт·год/кг	5,69 кВт·год/кг
Вища теплотворна здатність Q_v , МДж/кг	37,1 МДж/м ³	18,6 МДж/кг	17,0 МДж/кг	10,8 МДж/кг	21,8 МДж/кг
Питома теплота згоряння в перерахунку на об'єм сховища, МДж/м ³	–	10 200	8 680	1 710	14 350
Теоретична витрата повітря на горіння, м ³ /кг	10,2 м ³ /м ³	4,6	4,2	3,8	5,1
Вихід димових газів, м ³ /кг	10,8 м ³ /м ³	4,9	4,5	4,1	5,4
Адіабатна температура горіння, °С	~2 050	~1 700	~1 650	~1 580	~1 750
Температура димових газів за котлом, °С	110–140	130–160	140–170	150–180	125–155

Джерело: розроблено авторами.

Розуміння механізмів руйнації та ушкоджень матеріалів під впливом агресивних компонентів палива є ключовим для забезпечення довговічності котельного обладнання, де найбільш небезпечним агресивним агентом для металевих поверхонь є хлор, що міститься в

агробіомасі: при температурах вище 450°C хлориди лужних металів утворюють легкоплавкі евтектики, які руйнують захисний оксидний шар на поверхні сталі й ініціюють інтенсивну корозію, для природного газу агресивний вплив на конструкційні матеріали є мінімальним за відсутності корозійних домішок; ризик корозії формується лише при конденсації водяних парів у хвостовій частині газоходу. З огляду на це виникає потреба у порівняльному аналізі того, як окремі компоненти палива впливають на різні вузли котла. Відповідні результати наведено в табл. 4.

4. Вплив хімічного складу палива на конструкційні матеріали котла

Агресивний компонент	Джерело	Механізм впливу	Уражені вузли	Ступінь ризику (пелети А1 / агропелети)
Хлор Cl	Агробіомаса	Високотемпературна хлоридна корозія сталевих поверхонь	Топкові екрани, пароперегрівач	Низький / Високий
Лужні метали K, Na	Солома, зернові	Утворення легкоплавких силікатів, шлакування	Поверхні нагріву, решітка	Низький / Середній
Сірка S	Усі тверді палива	Сірчана корозія при температурі нижче точки роси	Хвостові поверхні, димохід	Низький / Середній
Зола (висока зольність)	Агропелети, тріска	Абразивне зношування, засмічення каналів	Конвективні поверхні, золозбірник	Низький / Середній
Смоли (при піролізі)	Тріска, волога біомаса	Відкладення смол у газоходах	Димохід, рекуператор	Середній / Середній
Кремнезем SiO ₂	Солома, рисова лузга	Абразивне зношення топкової решітки	Решітка, піддувало	Низький / Середній

Джерело: розроблено авторами.

З точки зору фізико-хімічних властивостей найбільш особливим матеріалом з позиції впливу на конструкційні матеріали котла є агропелети зі стебел соняшнику, що містять підвищений вміст хлору (до 0,15%), лужних металів і зольних залишків із низькою температурою плавлення (800–950°C). Це вимагає застосування конструкційних матеріалів підвищеної хімічної стійкості – аустенітних нержавіючих сталей типу 12X18H10T та жаростійкої кераміки Al₂O₃ – в зонах максимального теплового й хімічного навантаження. Вибір конструкційних матеріалів для різних вузлів котла є прямим наслідком аналізу агресивних компонентів, наведеного в попередній таблиці, і відображає накопичений багаторічний досвід провідних європейських виробників котельного обладнання. Саме з цим явищем зіткнулися данські теплові станції при спалюванні соломи в 1990-х роках, і саме воно змусило їх перейти на деревні пелети з нормованим вмістом хлору. Лужні метали калій і натрій, характерні для агробіомаси, є причиною шлакування – утворення в'язких відкладень на поверхнях нагріву, що суттєво знижують теплопередачу й можуть призводити до механічного пошкодження труб при видаленні. Якість димових газів є одночасно показником ефективності процесу горіння й показником екологічної безпеки котельні. Оптимальний коефіцієнт надлишку повітря α для різних видів біопалива відрізняється: деревні пелети потребують $\alpha = 1,20\text{--}1,30$, тоді як агропелети через нерівномірний фракційний склад і підвищену зольність – $\alpha = 1,25\text{--}1,35$. Перевищення оптимального значення α знижує температуру в топці й збільшує тепловтрати з димовими газами, що безпосередньо погіршує ККД котла. Показники викидів твердих частинок до і після фільтра демонструють принципову важливість системи димогазоочищення: без фільтра агропелети дають 150–300 мг/Нм³ твердих частинок, що у 3–6 разів перевищує норму директиви ЄС (50 мг/Нм³), тоді як Шведський досвід показує, що саме якість системи димогазоочищення є найбільш

критичним фактором для отримання дозволів на експлуатацію котелень на агробіомасі. Рекомендовані матеріали для основних вузлів котла залежно від виду палива наведено в табл. 5.

5. Рекомендовані матеріали для вузлів котла залежно від виду палива

Вузол котла	Природний газ	Деревні пелети А1	Агропелети	Деревна тріска
Топкові екрани	Ст. 20, Ст. 20ГС	Ст. 20, Ст. 20ГС	12Х1МФ або захисне покриття	12Х1МФ
Жарові труби	20К	20К	12Х18Н10Т (аустенітна нержавіюча сталь)	20К
Колосникова решітка	–	Сірий чавун СЧ25	Жаростійкий чавун ЖЧС-5	ЖЧС-5
Газохід (хвостова ділянка)	Ст. 3	Ст. 3	Кислотостійка сталь 08Х17Т	08Х17Т
Теплообмінні трубки	20К	20К	12Х1МФ	12Х1МФ
Пальникова гарнітура	Жаростійка сталь	Керамічні вставки	Жаростійка кераміка Al_2O_3	Жаростійка кераміка
Шнек подачі палива	–	Ст. 3, нержавіюча	Ст. 12Х18Н10Т (стійка до абразиву)	Зносостійка сталь Hardox
Бункер зберігання	–	Ст. 3	Ст. 3 (антикорозійне покриття)	Ст. 3

Джерело: розроблено авторами.

Технологічна придатність відображає практичну зручність використання кожного виду палива в реальних умовах експлуатації – і саме цей критерій часто є вирішальним при прийнятті рішення про перехід на рівні конкретного підприємства, навіть за умови очевидної економічної привабливості альтернативних варіантів. Для наочного порівняння відповідних показників для різних видів палива результати узагальнено на рис. 2.

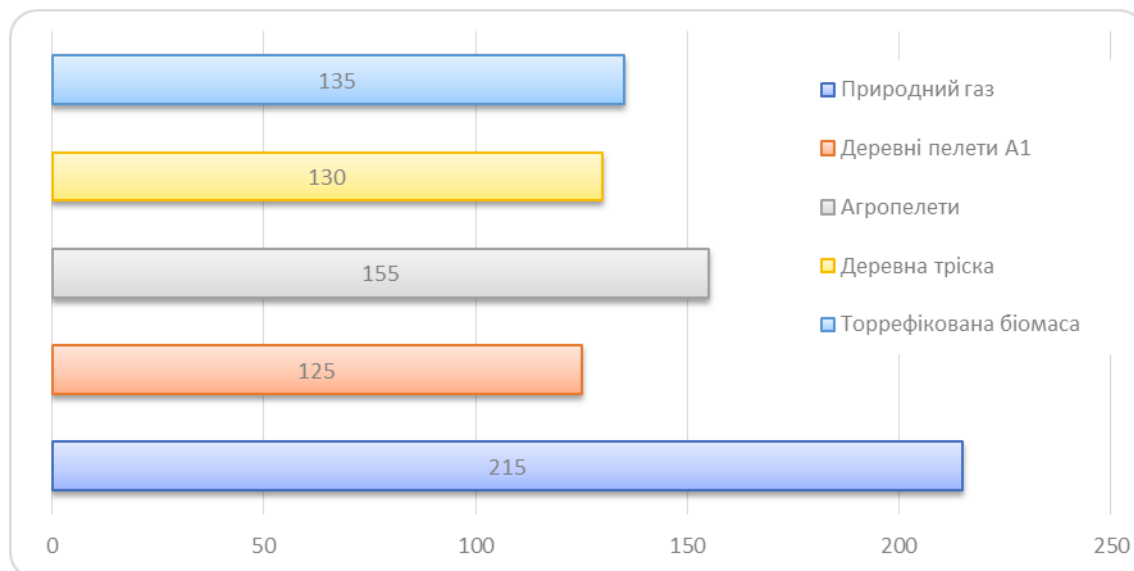


Рис. 2. Показники горіння та якості димових газів (при оптимальному $\alpha = 1,25$)

Джерело: розроблено авторами.

Природний газ отримує найвищі оцінки за зручністю подачі й стабільністю якості, однак отримує мінімальну оцінку за критерієм незалежності від зовнішньої мережі – і саме цей критерій виявився критичним в умовах воєнного часу для України. Деревна тріска,

попри найкращі економічні показники, отримує найнижчі оцінки за технологічністю через потребу в спеціалізованому завантажувальному обладнанні та найвищі вимоги до кваліфікації персоналу. Розрахунок річної витрати кожного з паливних матеріалів виконується на основі ефективної теплотворної здатності з урахуванням ККД котла й визначає всі подальші логістичні й економічні показники задачі. Річна теплопродуктивність котельні складає 5 362 500 кВт·год, і ця константа є спільною для всіх варіантів розрахунку. Найбільш наочним результатом таблиці є порівняння необхідного об'єму складського приміщення: для тріски потрібно 607 м³ для місячного запасу, що в 4,6 рази більше, ніж для торрефікованої біомаси (131 м³) і в 3,8 рази більше, ніж для пелет (161 м³). Саме ця різниця пояснює, чому фінські підприємства, що використовують тріску, вирішують логістичну задачу через мережу регіональних терміналів підсушування, а не через збільшення складів безпосередньо при котельнях. Фінські й шведські оператори котелень на трісці підтверджують: цей вид палива доцільний починаючи з потужності 3–5 МВт, де економія масштабу компенсує складність. Для котелень у діапазоні 1–2 МВт, що розглядається в задачі, пелети залишаються оптимальним технологічним вибором. Узагальнені результати порівняння основних характеристик досліджуваних паливних матеріалів наведено в табл. 6. Шкала оцінки: +++ – відмінно, ++ – добре, + – задовільно, X – непридатною.

6. Узагальнені результати дослідження

Критерій	Природний газ	Деревні пелети А1	Агропелети	Деревна тріска	Торрефікована біомаса
Придатність для автоматичної подачі	+++	+++	++	+	+++
Стабільність якості (партія до партії)	+++	+++	++	+	+++
Зручність зберігання	+++	++	++	+	+++
Можливість пневматичного завантаження	+++	+++	++	X	+++
Вимоги до персоналу (кваліфікація)	Середня	Середня	Середня	Висока	Середня
Потреба в частому технічному обслуговуванні	Низька	Низька	Середня	Висока	Низька
Ризик шлакування топки	Відсутній	Низький	Середній	Низький	Низький
Ризик корозії теплообмінних поверхонь	Низький	Низький	Середній	Низький	Низький
Залежність від зовнішньої мережі	Критична	Відсутня	Відсутня	Відсутня	Відсутня
Доступність в Україні	Середня	Висока	Висока	Висока	Низька

Джерело: розроблено авторами.

Економічний розрахунок зводить теплотехнічні показники до єдиного інтегрального критерію – собівартості виробленої гігакалорії, – що дозволяє пряме порівняння варіантів незалежно від виду палива й одиниць його виміру. Ключовим висновком таблиці є те, що всі чотири варіанти біопалива забезпечують нижчу собівартість Гкал порівняно з природним газом: від –20,9% для деревних пелет до –50,9% для деревної тріски. При цьому тріска, незважаючи на найнижчу собівартість тепла, потребує найвищих капітальних витрат і найскладнішої логістики – що пояснює, чому в австрійській і шведській практиці малих і середніх котелень перевага надається пелетам, а не трісці. Щорічна економія у 3,67 млн грн для агропелет є тією цифрою, що найбільш прямолінійно відображає реальний фінансовий вииграш від переходу.

Структура капітальних витрат відображає конкретні технічні рішення, необхідні для кожного з варіантів переходу, і дозволяє зрозуміти, за рахунок яких складових формується різниця між варіантами. Найбільша стаття витрат у всіх варіантах – це сам котлоагрегат із палинковим пристроєм, що становить 56–62% від загальної суми. Для агропелет і тріски суттєво вищими є витрати на систему димогазоочищення й золовидалення – рукавний фільтр замість циклонного коштує на 55 000 грн дорожче, – а також на будівництво або адаптацію складу палива: для тріски ця стаття складає 420 000 грн проти 150 000 грн для торрефікованої біомаси. Австрійські виробники котлів, зокрема KWB і Fröling, уніфікували конструкцію системи подачі для пелет і торрефікату, що дозволяє знизити капітальні витрати для цих двох варіантів до мінімуму серед усіх розглянутих.

Інвестиційні показники узагальнюють економічну привабливість кожного варіанту переходу через набір стандартних фінансових метрик, що дозволяє приймати обґрунтоване управлінське рішення. Індекс прибутковості PI є найбільш наочним серед них: значення 5,23 для деревної тріски означає, що на кожен вкладений в переобладнання гривню проект генерує 5,23 грн приведенного доходу за 10 років. Усі чотири варіанти мають PI значно вище мінімально прийняттого рівня 1,0 і демонструють дисконтований термін окупності в межах 1,2–2,3 року – показник, що є кращим за більшість альтернативних напрямів інвестування в комунальну інфраструктуру. Шведський досвід підтверджує реалістичність цих розрахунків: середній фактичний термін окупності котелень на деревній біомасі у Швеції при введенні вуглецевого податку становив 1,5–2,5 року, що є практично ідентичним розрахованим значенням. Технологічна придатність відображає практичну зручність використання кожного виду палива в реальних умовах експлуатації – і саме цей критерій часто є вирішальним при прийнятті рішення про перехід на рівні конкретного підприємства, навіть за умови очевидної економічної привабливості альтернативних варіантів. Природний газ отримує найвищі оцінки за зручністю подачі й стабільністю якості, однак отримує мінімальну оцінку за критерієм незалежності від зовнішньої мережі – і саме цей критерій виявився критичним в умовах воєнного часу для України. Деревна тріска, попри найкращі економічні показники, отримує найнижчі оцінки за технологічністю через потребу в спеціалізованому завантажувальному обладнанні та найвищі вимоги до кваліфікації персоналу. Фінські й шведські оператори котелень на трісці підтверджують: цей вид палива доцільний починаючи з потужності 3–5 МВт, де економія масштабу компенсує складність. Для котелень у діапазоні 1–2 МВт, що розглядається в задачі, пелети залишаються оптимальним технологічним вибором.

Інтегральне зважене оцінювання узагальнює результати попередніх розрахунків і дає змогу зіставити досліджувані види палива в межах єдиної порівняльної шкали з урахуванням значущості кожного критерію. Найбільшу вагу в оцінюванні отримали собівартість теплової енергії, термін окупності інвестицій та екологічні показники, оскільки саме вони найбільшою мірою визначають практичну доцільність переходу на альтернативне паливо. Проведене оцінювання показало, що природний газ має найнижчий підсумковий бал через поєднання вищої собівартості, менш сприятливих екологічних характеристик і залежності від зовнішньої інфраструктури постачання. Найвищий результат продемонстрували агропелети, що пояснюється поєднанням доступності сировини, прийнятних техніко-економічних параметрів і достатнього рівня енергетичної автономності. Отримане співвідношення свідчить, що комплексне оцінювання паливних матеріалів дає більш повне уявлення про їхню придатність для впровадження, ніж аналіз окремих показників ізольовано. Для наочного відображення підсумкових результатів побудовано рис. 3.

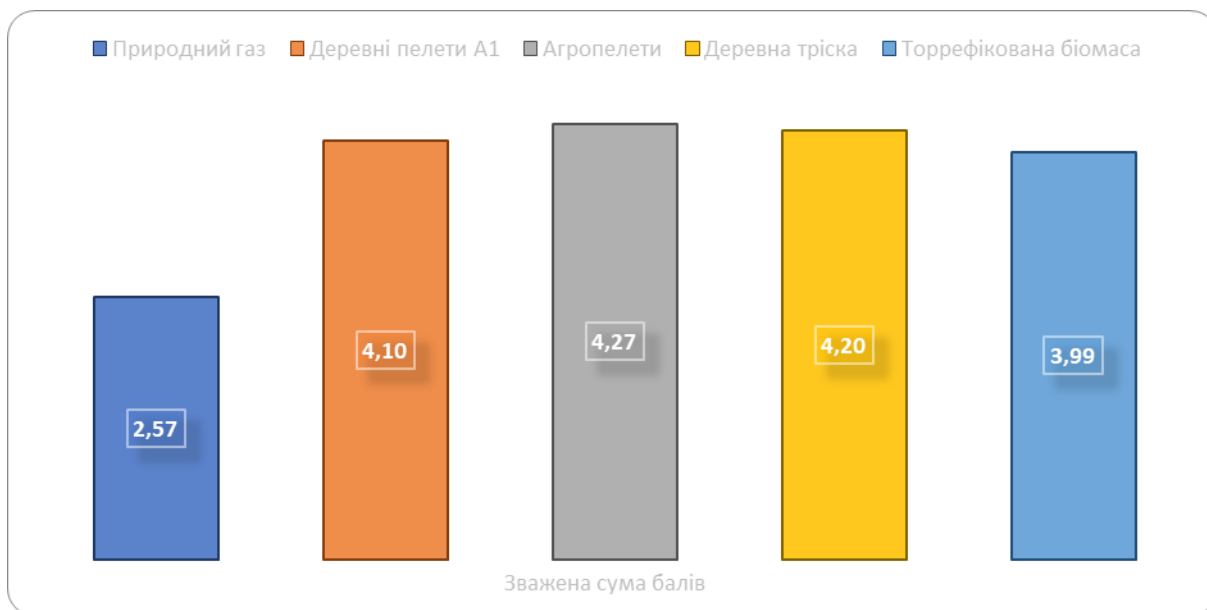


Рис. 3. Інтегральна матриця порівняння паливних матеріалів (зважена бальна оцінка)

Джерело: розроблено авторами.

Перехід котельних установок середньої потужності на біопаливо є не одним із можливих альтернативних шляхів розвитку теплоенергетики, а найбільш обґрунтованим, економічно ефективним і стратегічно виправданим вибором для вітчизняних умов на сучасному етапі. Реалізація цього переходу в масштабах, достатніх для суттєвого впливу на загальний енергетичний баланс країни, потребує скоординованих зусиль на трьох рівнях: технічному – у вигляді грамотного інженерного проектування з урахуванням матеріалознавчих особливостей конкретного виду палива; економічному – у вигляді доступу до фінансових інструментів підтримки та усунення регуляторних бар'єрів, зокрема несправедливого оподаткування вуглецево-нейтрального палива; стратегічному – у вигляді державної політики, що формує довгострокові стимули для розвитку ринку біопалива й відповідної виробничої інфраструктури. За умови системного підходу до цих трьох рівнів результат, досягнутий Швецією, Фінляндією, Данією та Австрією протягом двох-трьох десятиліть, є цілком досяжним для України у значно коротші терміни – оскільки шлях вже прокладено, помилки вже зроблено іншими, а технології й фінансові механізми вже існують і очікують на застосування.

Висновки. Проведене дослідження показало, що використання біомаси як палива для котелень є обґрунтованим напрямом підвищення енергоекологічної ефективності систем теплопостачання та зміцнення енергетичної стійкості в умовах воєнного стану. Пошкодження енергетичної й газотранспортної інфраструктури, системні відключення електроенергії та перебої з постачанням традиційних енергоносіїв виявили вразливість котелень, орієнтованих переважно на природний газ. За таких умов біомаса виступає не лише альтернативним ресурсом, а й інструментом диверсифікації паливної бази, підвищення автономності та зниження залежності від централізованих каналів енергопостачання. У роботі обґрунтовано, що Україна має достатню ресурсну базу для розвитку біоенергетичних рішень у секторі теплопостачання. Наявність деревної сировини, аграрних залишків і продуктів переробки біомаси створює передумови для формування локальних паливних ланцюгів у межах регіонів і територіальних громад, що має значення як для паливозаміщення, так і для підвищення стійкості об'єктів критичної інфраструктури. Порівняльний аналіз природного газу, деревних пелет A1, агропелет, деревної тріски та торрефікованої біомаси показав, що кожен із видів палива має специфічні теплотехнічні, фізичні, екологічні та експлуатаційні характеристики. Природний газ характеризується стабільністю якості та зручністю подачі, однак зберігає критичну залежність від зовнішньої

інфраструктури. Тверді види біопалива забезпечують більшу паливну автономність, хоча потребують урахування особливостей зберігання, транспортування, подачі та технічного обслуговування обладнання. Встановлено, що деревні пелети й торрефікована біомаса є найбільш технологічно зручними варіантами для автоматизованих котелень середньої потужності. Агропелети, попри вищі ризики шлакування й корозійного впливу, мають значний потенціал завдяки доступності сировини та нижчій собівартості теплової енергії. Деревна тріска забезпечує найнижчу собівартість тепла, однак супроводжується складнішою логістикою та вищими вимогами до експлуатації. Результати дослідження підтвердили, що вибір виду палива не може ґрунтуватися лише на теплотворній здатності або поточній вартості. Доцільність переходу визначається сукупністю критеріїв, серед яких собівартість теплової енергії, термін окупності інвестицій, екологічні характеристики, сумісність із конструкційними матеріалами, технологічність автоматизації, доступність сировини та стійкість логістичних ланцюгів. Саме такий підхід дає підстави вважати найбільш збалансованими для сучасних українських умов агропелети та деревні пелети. Аналіз досвіду Данії, Фінляндії, Швеції та Австрії засвідчив, що перехід до використання біомаси в секторі теплопостачання є реалістичним за умови поєднання технічної адаптації обладнання, розвитку ринку біопалива, економічних стимулів і належної організації постачання. Для України цей досвід є важливим орієнтиром, однак потребує адаптації до умов воєнного стану, структури місцевої сировинної бази та стану комунальної інфраструктури. Отже, використання біомаси у котельнях слід розглядати як один із напрямів підвищення енергоекологічної ефективності та зниження системних ризиків у сфері теплопостачання. Подальше дослідження доцільно спрямувати на розроблення комплексної моделі адаптації котелень до використання локальних видів біомаси з урахуванням критеріїв вибору палива, параметрів модернізації обладнання, вимог до конструкційних матеріалів і логістики формування паливних запасів в умовах воєнних та енергетичних ризиків.

Список використаних джерел

1. Височин А. Ю., Височин Д. Ю., Щербак І. О. Інтеграція міжнародного досвіду в стратегії підвищення фінансово-економічної безпеки громад в Україні. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. № 12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15665012>
2. Анісімова Г. В. Забезпечення безпеки довкілля, життя та здоров'я громадян в умовах воєнного стану: еколого-правові аспекти. *Проблеми законності*. 2022. № 157, С. 93–115. <https://doi.org/10.21564/2414-990X.157.256787>
3. Боженко М. Ф., Іжевська Т. Л. Центральні системи кондиціонування повітря з частковим непрямим випарним охолодженням і утилізацією холоду і теплоти вентиляційних викидів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2021. № 4(8). С. 35–41. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.05>
4. Babak V., Nikitin Y., Teslenko O. Holistic approach to the systemic transformation of the electric power industry, district heating and municipal infrastructure. *System Research in Energy*. 2024. № 4(80). P. 6–25. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006>
5. Stanytsina V., Nechaieva T., Trokhaniak V., Horskyi V., Teslenko O. Electricity and heat supply technologies for increasing the energy independence of certain territorial communities. *System Research in Energy*. 2023. Vol. 4(75), P. 32–44. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.032>
6. Серафим О. Державний контроль в енергетичному секторі в умовах воєнного стану: адміністративно-правові аспекти. *Вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*. 2026. № 3. С. 349–355. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2025.92.3.49>
7. Ye C., Xu W., Jiang Y., Mu Z., Cui Z., Wu H., Liu S. Design of the control and remote monitoring energy system based on an embedded biomass boiler. *Frontiers in Energy Research*. 2024. Vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1434112>
8. Shyshko Y., Cherniavskyi A., Shyshko D., Borychenko O., Zaporozhets A., Zaitsev I. Increasing the efficiency of loading devices for biomass boilers. *Energies*. 2024. Vol. 17. Art. 590. <https://doi.org/10.3390/en17030590>

9. Guarino F., Cellura M., Traverso M. Constructal law, exergy analysis and life cycle energy sustainability assessment: An expanded framework applied to a boiler. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2020. Vol. 25. P. 2063–2085. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01779-9>

10. Inegbedion H., Asaleye A., David J., Sajuyigbe A., Akinrinlola M. Energy efficiency and environmental sustainability using green energy as a mediating variable. *Discover Sustainability*. 2026. Vol. 7. Art. 272. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01858-7>

11. Li Y., Slosson J., Yi H. Microscale mechanical testing of biomass particles. 2026. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=53665>

12. Kolesnyk V., Pavlychenko A., Moniuk I. Evaluation of energy ecological efficiency of technologies for resource saving and protection of the atmosphere from emissions in the «boiler-house – heat consumers – environmental» system. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. 2020. Vol. 22. P. 23–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.04>

13. Lund H., Mathiesen B., Connolly D., Østergaard P. Renewable energy systems: A smart energy systems approach to the choice and modelling of 100% renewable solutions. *Chemical Engineering Transactions*. 2014. Vol. 39. P. 1–6. <https://doi.org/10.3303/CET1439001>

14. Kilpeläinen A., Torssonon P., Strandman H., Kellomäki S., Asikainen A., Peltola H. Net climate impacts of forest biomass production and utilization in managed boreal forests. *GCB Bioenergy*. 2014. Vol. 8(2). P. 307–316. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12243>

15. Gazal A., Jakrawatana N., Silalertruksa T., Gheewala S. Water-energy-food nexus review for biofuels assessment. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2022. Vol. 11(1), P. 193–205. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41119>

16. Pröll T., Rauch R., Aichernig C., Hofbauer H. Fluidized bed steam gasification of solid biomass: Performance characteristics of an 8 MWth combined heat and power plant. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2007. Vol. 5. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1398>

THE USE OF BIOMASS AS A FACTOR FOR INCREASING THE ENERGY- ECOLOGICAL EFFICIENCY OF BOILER PLANTS AND ENSURING ENERGY SUSTAINABILITY IN CONDITIONS OF MARTIAL LAW

A. Pravovierov, K. Romanova

Abstract. *The disruption of energy infrastructure functioning in Ukraine under martial law exacerbates the problem of ensuring reliable heat supply. The dependence of boiler plants on natural gas reduces their resilience to crisis impacts, highlighting the need to transition to alternative and locally available energy sources, particularly biomass.*

The aim of this article is to assess the potential of using biomass to enhance the energy and environmental efficiency of boiler plants and ensure their energy resilience. To achieve this goal, the study focuses on identifying key characteristics of biofuels, evaluating their impact on boiler performance, and substantiating the feasibility of implementing bioenergy solutions based on international experience.

The study employs a comparative analysis of the characteristics of natural gas and various types of biomasses, a systems approach to considering boiler plants as integrated energy-technological systems, calculation methods for assessing thermal and economic performance indicators, as well as elements of experimental analysis of fuel composition and generalization of foreign experience.

It has been established that using biomass contributes to increasing the energy autonomy of boiler plants and reducing the cost of heat production compared to natural gas. The efficiency of biofuel boiler operations depends on the consistency of their technological components and the consideration of fuel properties. The feasibility of using wood pellets and torrefied biomass for medium-capacity boiler plants is substantiated, while agro-biomass requires accounting for corrosion and slagging risks. The adaptation of European bioenergy models to domestic conditions is demonstrated.

The use of biomass is an effective approach to improving the energy-environmental efficiency and resilience of heat supply systems under martial law. Transitioning to biofuels ensures diversification of energy sources, reduces dependence on imported resources, and promotes the development of local fuel markets. Implementing this approach requires a comprehensive consideration of technical, economic, and resource factors.

Key words: *biomass, boiler plants, energy resilience, martial law, renewable energy, biofuel, energy independence, systemic outages, heat supply*

References

1. Vysocyn, A. Yu., Vysocyn, D. Yu., & Shcherbak, I. O. (2025). Intehratsiia mizhnarodnoho dosvidu v stratehii pidvyshchennia finansovo-ekonomichnoi bezpeky hromad v Ukraini [Integration of international experience into strategies for enhancing the financial and economic security of communities in Ukraine]. *Aktualni pytannia ekonomichnykh nauk*, 12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15665012> [in Ukrainian].
2. Anisimova, H. V. (2022). Zabezpechennia bezpeky dovkillia, zhyttia ta zdorovia hromadian v umovakh voiennoho stanu: ekoloho-pravovi aspekty [Ensuring environmental, life and health safety of citizens under martial law: environmental and legal aspects]. *Problemy zakonnosti*, 157, 93–115. <https://doi.org/10.21564/2414-990X.157.256787> [in Ukrainian].
3. Bozhenko, M. F., & Izhevska, T. L. (2021). Tsentralni systemy kondytsionuvannia povitria z chastkovym nepriamym vyparnym okholodzhenniam i utylizatsiieiu kholodu i teploty ventyliatsiinykh vykhydiv [Central air conditioning systems with partial indirect evaporative cooling and recovery of cold and heat from ventilation emissions]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia*, 4(8), 35–41. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.05> [in Ukrainian].
4. Babak, V., Nikitin, Y., & Teslenko, O. (2024). Holistic approach to the systemic transformation of the electric power industry, district heating and municipal infrastructure. *System Research in Energy*, 4(80), 6–25. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006>
5. Stanytsina, V., Nechaieva, T., Trokhaniak, V., Horskyi, V., & Teslenko, O. (2023). Electricity and heat supply technologies for increasing the energy independence of certain territorial communities. *System Research in Energy*, 4(75), 32–44. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.032>
6. Serafyn, O. (2026). Derzhavnyi kontrol v enerhetychnomu sektori v umovakh voiennoho stanu: administratyvno-pravovi aspekty [State control in the energy sector under martial law: administrative and legal aspects]. *Visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Pravo*, 3, 349–355. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2025.92.3.49> [in Ukrainian].
7. Ye, C., Xu, W., Jiang, Y., Mu, Z., Cui, Z., Wu, H., & Liu, S. (2024). Design of the control and remote monitoring energy system based on an embedded biomass boiler. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1434112> [in Ukrainian].
8. Shyshko, Y., Cherniavskiy, A., Shyshko, D., Borychenko, O., Zaporozhets, A., & Zaitsev, I. (2024). Increasing the efficiency of loading devices for biomass boilers. *Energies*, 17, Article 590. <https://doi.org/10.3390/en17030590>
9. Guarino, F., Cellura, M., & Traverso, M. (2020). Constructal law, exergy analysis and life cycle energy sustainability assessment: An expanded framework applied to a boiler. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 2063–2085. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01779-9>
10. Inegbedion, H., Asaleye, A., David, J., Sajuyigbe, A., & Akinrinlola, M. (2026). Energy efficiency and environmental sustainability using green energy as a mediating variable. *Discover Sustainability*, 7, Article 272. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01858-7>
11. Li, Y., Slosson, J., & Yi, H. (2026). Microscale mechanical testing of biomass particles. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=53665>
12. Kolesnyk, V., Pavlychenko, A., & Moniuk, I. (2020). Evaluation of energy ecological efficiency of technologies for resource saving and protection of the atmosphere from emissions in the “boiler-house – heat consumers – environmental” system. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 22, 23–31. <https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.04>
13. Lund, H., Mathiesen, B., Connolly, D., & Østergaard, P. (2014). Renewable energy systems: A smart energy systems approach to the choice and modelling of 100% renewable solutions. *Chemical Engineering Transactions*, 39, 1–6. <https://doi.org/10.3303/CET1439001>
14. Kilpeläinen, A., Torssonen, P., Strandman, H., Kellomäki, S., Asikainen, A., & Peltola, H. (2014). Net climate impacts of forest biomass production and utilization in managed boreal forests. *GCB Bioenergy*, 8(2), 307–316. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12243>
15. Gazal, A., Jakrawatana, N., Silalertruksa, T., & Gheewala, S. (2022). Water-energy-food nexus review for biofuels assessment. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(1), 193–205. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41119>
16. Pröll, T., Rauch, R., Aichernig, C., & Hofbauer, H. (2007). Fluidized bed steam gasification of solid biomass: Performance characteristics of an 8 MWth combined heat and power plant. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1398>