

© В.В. Ішков^{1,2}, К.М. Колчев¹, О.С. Дрешпак¹, Є.С. Козій^{2,3}, В.М. Мандрікевич¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

³ Технічний університет «Метінвест політехніка», Запоріжжя, Україна

ЕВОЛЮЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ТОРФУ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТРЕБ: ВІД ВОГНИЩ ПАЛЕОЛІТУ ДО БІОРЕФАЙНІНГУ ХХІ СТОЛІТТЯ

V. Ishkov^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-3987-208X>

K. Kolchev¹, <https://orcid.org/0000-0003-1345-8646>

O. Dreshpak¹, <https://orcid.org/0000-0003-1019-4382>

Ye. Kozii^{2,3}, <https://orcid.org/0000-0002-2167-6224>

V. Mandrikevych¹ <https://orcid.org/0000-0002-3998-820X>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Institute of Geotechnical Mechanics named by M.S. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

³ Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

EVOLUTION OF PEAT USE FOR ENERGY NEEDS: FROM PALAEOLOGIC FIRES TO 21ST CENTURY BIOREFINING

Мета роботи. Метою даної роботи є комплексний аналіз багатовікової еволюції технологій використання торфу для енергетичних потреб – від найдавніших часів до сучасних біорефайнгових концепцій – та оцінка його перспектив у контексті біоекономіки та декарбонізації.

Методологія. Дослідження ґрунтується на комплексному міждисциплінарному підході, що поєднує дані археології, історії технологій, хімічної технології та екології. Використано історико-генетичний, порівняльно-технологічний, системний аналіз та техніко-економічні методи. Джерельну базу склали археологічні звіти, історичні та етнографічні джерела, сучасна науково-технічна література та звіти міжнародних організацій.

Основні результати досліджень. Встановлено ключові етапи еволюції: від використання торфу неандертальцями в палеоліті через його роль як базового місцевого палива в аграрних суспільствах до індустріалізації видобутку (фрезерний спосіб, брикетування) у ХІХ-ХХ ст. та переходу до глибинної переробки в ХХ-ХХІ ст. Останній етап включає розвиток композитних палив (торфовугілля, торф'яні водовугільні суспензії, торфовідхідні брикети), термічних методів (піроліз, газифікація, карбонізація) та біотехнологій (анаеробне зброджування, отримання гумінових речовин). Визначено унікальне положення торфу як «повільно відновлюваного» ресурсу з подвійною екологічною роллю: значні викиди CO₂ при спалюванні, але потенціал для стабілізації біоенергетичних процесів та інтеграції в циркулярну економіку за умови раціонального управління та рекультивації торфовищ.

Наукова новизна результатів. Полягає у реалізації комплексного міждисциплінарного підходу до історії торф'яної енергетики. Вперше в межах одного дослідження простежено єдину лінію еволюції технологій використання торфу – від палеолітичних вогнищ до сучасних

концепцій біорефайнінгу, що дозволило виявити стійкі закономірності та технологічні парадигми його освоєння.

Практична значимість результатів. Результати дослідження надають систематизовану основу для розробки збалансованих регіональних програм використання торф'яних ресурсів. Матеріали статті можуть бути використані органами влади та енергетичними компаніями для формування стратегій, науково-дослідними організаціями для визначення пріоритетних напрямків розробки нових технологій переробки, а також в освітньому процесі при підготовці фахівців у галузі біоенергетики та раціонального природокористування.

Ключові слова: торф, історія енергетики, паливо, термічна переробка, біотехнології, відновлювані джерела енергії.

Вступ. Торф, як один із найпоширеніших видів місцевих органічних ресурсів, протягом тисячоліть відігравав ключову роль у забезпеченні енергетичних потреб людства. У сучасну епоху, яка характеризується пошуком балансу між енергетичною безпекою, економічною ефективністю та екологічною стійкістю, інтерес до торфу набуває нового звучання та особливої актуальності. З одного боку, він є повільно відновлюваним ресурсом, використання якого пов'язане з викликами в галузі зміни клімату. З іншого боку, сучасні технології його глибинної та комплексної переробки відкривають шлях до створення гібридних палив, біохімікатів та інтеграції торфу в моделі циркулярної економіки. Це робить комплексний аналіз еволюції торф'яної енергетики не лише історично значущим, але й практично затребуваним для формування збалансованих енергетичних стратегій у регіонах із значними запасами торфу.

Історії використання торфу як палива присвячено значну кількість робіт, проте вони часто мають фрагментарний характер. Археологічні та історичні дослідження детально висвітлюють його застосування в давнину та в традиційних суспільствах [1–4]. Технічна література досить повно описує технології промислового видобутку (фрезерний торф, брикетування) та їх розвиток у XX столітті [5–7]. Сучасні наукові публікації концентруються на окремих аспектах – термічній переробці [8, 9], композитних паливах [10, 11] або біотехнологічних методах [12, 13]. Однак у науковій літературі відчувається нестача узагальнюючих робіт, які б простежили єдину лінію еволюції – від простого спалювання сировини до комплексного, високотехнологічного перетворення в контексті сталого розвитку. Таким чином, існують розриви між історичним, технологічним та екологічним підходами до оцінки ролі торфу в енергетиці.

Метою даної роботи є комплексний аналіз багатовікової еволюції технологій використання торфу для енергетичних потреб – від найдавніших часів до сучасних біорефайнгових концепцій – та оцінка його перспектив у контексті біоекономіки та декарбонізації.

Об'єктом дослідження виступає торф як багатокomпонентна органічна сировина для енергетичного використання.

Предметом дослідження є історична та технологічна еволюція методів і технологій видобутку, переробки та застосування торфу для енергетичних потреб.

Основна частина. Методика досліджень. Дане дослідження базується на комплексному міждисциплінарному підході, що зумовлено специфікою об'єкта

вивчення, який охоплює тисячолітній період і поєднує технологічні, екологічні та соціально-економічні аспекти. Для вирішення поставлених завдань було використано широкий спектр методів із залученням різноманітних джерел.

Джерельна база дослідження включає кілька великих блоків:

1. *Дані археологічних та палеоекологічних досліджень*: Ключовими для реконструкції найдавніших етапів використання торфу стали публікації, що містять результати мікоморфологічного, фітолітного та палінологічного аналізу відкладень з палеолітичних та мезолітичних стоянок (печери Теопетра, Кебара, Les Canalettes тощо) [1, 2, 14]. Ці роботи дозволили ідентифікувати видовий склад палива та простежити діахронні зміни у паливних стратегіях древньої людини.

2. *Історичні, етнографічні та технічні джерела*: Для аналізу періоду традиційного та ранньоіндустріального використання торфу залучалися історичні огляди, етнографічні описи та технічна література, що висвітлюють регіональні практики видобутку та застосування торфу в Ірландії, Скандинавії, Нідерландах та інших регіонах [3, 4, 15, 16].

3. *Сучасна науково-технічна література*: Основний масив даних склали наукові статті, огляди та патенти, що відображають розвиток технологій у XX–XXI століттях. Це включає публікації з технологій фрезерного видобутку, брикетування та гранулювання [5–7], дослідження в галузі композитних палив [10–12], термічної переробки (піроліз, газифікація) [8, 9, 14] та біотехнологічних методів [17–19].

4. *Нормативно-технічна документація та звіти міжнародних організацій*: Для порівняльного аналізу енергетичних та екологічних параметрів, а також для оцінки ролі торфу в контексті зміни клімату використовувалися звіти Міжурядової групи експертів з зміни клімату (IPCC), Міжнародного енергетичного агентства (IEA), ФАО та інших організацій [20–24].

Для обробки та аналізу зібраної інформації було застосовано комплекс взаємодоповнюючих методів:

1. *Історико-генетичний метод*: Дозволив виявити причинно-наслідкові зв'язки та основні етапи в еволюції технологій використання торфу, простеживши їхню спадкоємність та якісні зміни від давнини до наших днів.

2. *Порівняльно-історичний та порівняльно-технологічний аналіз*: Був використаний для зіставлення регіональних моделей торфокористування (наприклад, ірландської, фінської, радянської), а також для порівняння ефективності, економічних та екологічних параметрів різних технологій переробки (наприклад, брикетування vs. гранулювання, пряма газифікація vs. піроліз).

3. *Системний аналіз*: Застосовувався для розгляду торф'яної енергетики як складної системи, що включає такі взаємопов'язані елементи, як ресурсна база, технології видобутку та переробки, економічні драйвери та екологічні обмеження. Це дозволило оцінити місце торфу в ширших системах – енергетичному балансі регіону, циркулярній економіці, біоекономіці.

4. *Техніко-економічний аналіз*: Був використаний для узагальнення даних за ключовими показниками різних видів торф'яного палива та технологій їх

виробництва (теплотворна здатність, зольність, вологість, собівартість), а також для оцінки їхньої конкурентоспроможності по відношенню до інших енергоносіїв.

5. Метод класифікації та систематизації: Дозволив упорядкувати широкий спектр технологій переробки торфу за хронологічним та технологічним принципами (механічні, термічні, біологічні), створивши чітку та логічну структуру дослідження.

Відбір використаних джерел проводився на основі критеріїв наукової репутації (публікація в рецензованих журналах, індекс цитування), релевантності поставленим завданням, а також новизни даних. При аналізі технологій особливу увагу приділялося таким параметрам, як енергетична ефективність, екологічний вплив, рівень технологічної готовності (Technology Readiness Level – TRL) та економічна доцільність у конкретних історичних і регіональних контекстах.

Використаний у роботі комплексний методологічний підхід забезпечив репрезентативність та достовірність отриманих результатів, дозволивши виконати мету дослідження.

Результати досліджень та їх обговорення. Витоки: торф як паливо в доісторичну епоху. Використання торфу в якості джерела тепла сягає глибокої давнини і охоплює не лише епоху Homo sapiens, але й більш ранні стадії еволюції роду Homo. Археологічні дані переконливо свідчать про те, що торф застосовувався як паливо вже в середньому палеоліті, зокрема неандертальцями (Homo neanderthalensis), що вказує на їхню здатність до адаптації та використання різноманітних ресурсів навколишнього середовища.

Одним з найраніших і детально документованих свідчень є дослідження печери Теопетра (Греція). Стратиграфічний аналіз виявив два хронологічні періоди проживання: середній палеоліт (~50 000–40 000 років тому, Homo neanderthalensis) та верхній палеоліт (~34 000–28 000 років тому, Homo sapiens). Мікроморфологічне вивчення зразків з вогнищ показало, що як паливо в обидва періоди поряд з деревиною цілеспрямовано використовувалися гній і торф. Це свідчить про діахронну стратегію паливного забезпечення, де вибір палива визначався не стільки культурною традицією, скільки його доступністю та ефективністю в конкретних умовах [1].

Додаткові докази застосування торфу неандертальцями отримані при вивченні печери Кебара (Ізраїль). Високоточний аналіз фітолітів (мікроскопічних кремнеземних частинок рослин) і тонких зрізів (micromorphology) вогнищних відкладень дозволив ідентифікувати залишки торфу. Дослідження демонструє, що неандертальці не просто використовували випадковий горючий матеріал, а усвідомлено застосовували торф для розпалювання та тривалого підтримання стабільного вогню, що має ключове значення для виживання в прохолодному кліматі [2].

Аналогічні висновки були зроблені при вивченні стоянок у Франції. На прикладі печер Les Canalettes (мустьєрський період, ~60 000–40 000 років тому, Homo neanderthalensis) та Les Usclades (мезоліт, ~9 000 років тому, Homo sapiens) було проведено петрографічний і палінологічний аналіз вуглистих залишків. Результати підтвердили використання викопного палива, зокрема торфу, в обох

хронологічних пластах. Це вказує на спадкоємність у освоєнні ресурсів та незалежне відкриття торфу як ефективного палива різними видами людини в різних географічних регіонах [25].

У період мезоліту (~10 000–5 000 років до н.е.) на території Європи використання торфу стає більш систематичним. Археоботанічні дослідження та реконструкції палеоекономіки показують, що торф і деревина використовувалися в якості альтернативних джерел палива. Вибір між ними визначався насамперед локальною доступністю ресурсів: у лісистих регіонах домінувала деревина, тоді як на територіях з великими торфовищами (наприклад, у деяких частинах Північної Європи та на Британських островах) торф ставав важливим, а часто й основним видом палива [26]. Ця гнучкість паливних стратегій підкреслює раціональне природокористування древніх спільнот.

Таким чином, торф як паливо має не лише індустріальну, але й глибоко архаїчну історію, що сягає корінням у палеоліт. Його застосування неандертальцями та ранніми *Homo sapiens* демонструє універсальність та адаптивність цього ресурсу в різних кліматичних і культурних умовах. Раннє освоєння торфу свідчить про здатність доісторичних людей до емпіричного пізнання властивостей органічних осадових матеріалів та їх інтеграції в життєзабезпечуючі практики, заклавши основу для його подальшого багатовікового використання.

Торф у традиційній енергетиці аграрних суспільств. Із переходом від присвоювального господарства до осілих аграрних і ремісничих культур торф поступово зайняв міцне місце в системі локального енергозабезпечення. Його використання стало особливо актуальним у регіонах з обмеженими лісовими ресурсами або в умовах підвищеного попиту на деревину для будівництва та ремесел, що зумовило його регіонально-адаптивний характер.

На території Ірландії та Шотландії торф застосовувався в якості основного побутового палива з раннього Середньовіччя. В умовах вологого клімату, великих боліт (bogs) та малопридатних для землеробства ґрунтів торф'яні поклади стали критично важливим і доступним джерелом енергії для опалення жител та приготування їжі. Етнографічні та археологічні дослідження детально документають традиційну технологію: ручний видобуток торфу спеціальними лопатами (наприклад, ірландською «slean»), сушіння на відкритому повітрі та зберігання у штабелях для використання у вогнищах протягом усього року [3].

У Скандинавії, і особливо в Ісландії, де дефіцит деревини був виражений найбільш гостро, торф також відіграв ключову роль в енергетичному балансі. Ісландські фермери в умовах суворого клімату розробили ефективну систему заготовки: торф'яні пласти вирізалися блоками, висушувалися і складовалися в спеціальних сховищах. Іноді торф застосовувався спільно з висušеним гноєм, що дозволяло підвищити теплотворну здатність палива та вирішити проблему нестачі ресурсів [27].

У континентальній Європі, зокрема в Німеччині та Нідерландах, торф набув нового значення в період пізнього Середньовіччя та раннього Нового часу у зв'язку з інтенсивним зростанням міст та ремісничого виробництва. У XVII–XVIII століттях торф став важливим промисловим паливом для таких енергоємних

процесів, як випалювання цегли, скловаріння та броварство. Особливо активно його видобуток вівся в болотистих районах Нідерландів, де склалася ціла торф'яна індустрія, що постачала міста та сприяла осушенню земель [4].

У Фінляндії та країнах Балтії торф традиційно використовувався в сільській місцевості для опалення лазень (саун), житлових будинків та для сільськогосподарських потреб. Його застосування було зумовлене повсюдною доступністю родовищ і простотою кустарного видобутку, що робило його незамінним ресурсом у селянському господарстві [28].

Таким чином, в доіндустріальну епоху торф виступав у ролі стратегічного місцевого палива, що забезпечувало енергетичну безпеку спільнот у специфічних природних умовах. Його використання було детерміноване комплексом екологічних, економічних і технологічних факторів, а також глибокими культурними традиціями, що зробили торф невід'ємною частиною енергетичного ландшафту Європи.

Індустріалізація торф'яної галузі: механізація та стандартизація. Із розвитком промисловості в XIX–XX століттях торф перейшов із категорії місцевого палива у сферу стратегічного індустріального ресурсу. Його масовий видобуток і переробка стали можливими завдяки механізації процесів, стандартизації продукції та розширенню застосування в теплоенергетиці та промисловості, що ознаменувало якісно новий етап в його історії.

Фрезерний спосіб видобутку, розроблений на початку XX століття, став справжньою революцією в галузі. На відміну від шматкового (різного) методу, він ґрунтується на механічному фрезеруванні (розпушуванні) верхнього шару торф'яної залягання на глибину 2–3 см з подальшим сушінням у природних умовах та збиранням спеціальними машинами. Це дозволило різко збільшити обсяги видобутку, значно знизити трудомісткість і створити основу для повної механізації процесу [5].

Фрезерний торф характеризується високим ступенем однорідності та придатний для спалювання у великих котельних установках. Найбільше поширення ця технологія отримала в колишньому СРСР, Фінляндії, Німеччині та Ірландії. У Фінляндії, наприклад, фрезерний торф став основним видом торф'яного палива для теплоелектроцентралей (ТЕЦ) у період 1960–1980-х років, що стимулювало розвиток цілого парку спеціалізованої техніки: фрезерних барабанів, ворошилок, збирачів-навантажувачів [6].

Наступним кроком в еволюції торф'яного палива стало пресування. Технологія виробництва торф'яних брикетів шляхом механічного ущільнення подрібненого та висушеного фрезерного торфу дозволила вирішити ключові проблеми: підвищити енергетичну щільність, покращити транспортабельність та забезпечити стабільність параметрів горіння.

У Німеччині, Австрії та скандинавських країнах торф'яні брикети активно використовувалися в першій половині XX століття в побутовому секторі та на малих підприємствах як стандартизоване та зручне паливо, часто порівнянне за якістю з низькосортним вугіллям. Їхнє виробництво регламентувалося технічними стандартами, що гарантували рівномірну щільність та низьку вологість [7].

У Канаді та Ірландії брикети позиціонувалися як ефективна альтернатива вугіллю та дровам для опалення сільських будинків [16].

Гранулювання (виробництво пелет) – це технологія, що отримала розвиток наприкінці ХХ – на початку ХХІ століття як відповідь на зростаючий попит на автоматизовані системи опалення. Торф'яні гранули виробляються з сухої торф'яної сировини шляхом пресування через матриці без додавання або з мінімальною кількістю зв'язуючих речовин.

Гранульований торф відрізняється високою насипною щільністю, низькою зольністю та ідеальною сипучістю, що робить його придатним для використання в сучасних пелетних котлах з автоматичною подачею палива. Він знайшов застосування в країнах Північної Європи та в Канаді в якості конкурентоспроможного та екологічно прийняттого виду палива для малих і середніх об'єктів теплопостачання [29].

Таким чином, індустріальна епоха трансформувала торф із кустарного палива в стандартизований продукт із передбачуваними характеристиками. Розвиток технологій видобутку (фрезерний спосіб) та переробки (брикетування, гранулювання) дозволив інтегрувати торф у системи централізованого теплопостачання та малу енергетику, заклавши основу для наступного етапу – глибинної переробки.

Композитні палива: синергія торфу з іншими компонентами. Розвиток технологій переробки торфу в ХХ–ХХІ століттях призвів до створення широкого спектру композитних паливних матеріалів, що поєднують торф з іншими органічними та мінеральними компонентами. Ці продукти відрізняються покращеними енергетичними характеристиками, технологічністю застосування та дозволяють вирішувати завдання утилізації відходів.

Інтеграція торфу з вугіллям спрямована на підвищення теплотворної здатності та покращення характеристик горіння. Торфовугільні суміші, особливо з бурим вугіллям, дозволяють нівелювати такі недоліки торфу, як висока вологість та низька щільність. Дослідження, проведені в Німеччині та Польщі, показали, що такі композиції досягають теплотворної здатності 18–20 МДж/кг, знижують зольність та підвищують стабільність горіння, що робить їх придатними для використання в промислових котлах [10].

Більш технологічною формою є торф'яні водовугільні суспензії (ТВВС) – рідке паливо, що складається з тонко подрібненого торфу, вугільного пилу, води та стабілізуючих добавок. Принцип використання ТВВС ґрунтується на рівномірній подачі суспензії через форсунки в камеру згоряння. Ключові переваги включають зниження витрат на транспортування та зберігання, можливість використання низькоякісного торфу та вугільних шлаків, а також зниження викидів твердих частинок та оксидів сірки порівняно зі спалюванням чистого вугілля. Дослідження в Китаї та Німеччині підтвердили ефективність ТВВС в якості заміника мазуту та вугільного пилу за дотримання технологічних параметрів [11].

Композиції торфу з агропромисловими відходами (солома, тирса) та технологічними органічними компонентами (осади стічних вод, паперові шлами) вирішують двоєдине завдання: створення локального палива та утилізація відходів.

Торфосолома характеризується високою пористістю, покращеною здатністю до займання та зниженою собівартістю. У Фінляндії та Швеції такі суміші застосовуються в малих котельнях, дослідження показують, що додавання соломи до торффу сприяє більш повному згорянню та зниженню викидів сірки та оксидів азоту [2].

Торфовідхідні брикети, що виробляються шляхом пресування сумішей торффу з різними органічними залишками, знайшли застосування в комунальному та сільському господарстві Канади та країн Балтії. За оптимальної рецептури їхня теплотворна здатність сягає 16 МДж/кг, а виробництво сприяє створенню замкнутих циклів використання ресурсів [13].

Термічна переробка торффу: перспективний шлях до отримання високоенергетичних продуктів. Термічні методи переробки торффу дозволяють вийти за рамки прямого спалювання, перетворюючи його на газоподібні, рідкі та тверді продукти з високою доданою вартістю.

Основні процеси термічної переробки торффу: піроліз, газифікація, карбонізація. Піроліз (розкладання без доступу кисню) призводить до отримання трьох основних фракцій: торф'яного газу, рідких смол (біоолії) та твердого вуглецевого залишку – торф'яного коксу. Цей процес концентрує енергетичну цінність торффу та надає сировину для хімічної промисловості [8].

Газифікація (контрольоване окиснення за високих температур) спрямована на виробництво горючого синтез-газу (суміш CO , H_2 , CH_4). Дослідження у Фінляндії та Канаді демонстрували можливість отримання за допомогою цієї технології чистого палива з низьким рівнем викидів, наприклад, у реакторах з циркулюючим киплячим шаром [9].

Карбонізація (низькотемпературний піроліз) використовується для виробництва торф'яного коксу з високим вмістом вуглецю, який може застосовуватися не лише як паливо, але й як сорбент або компонент композиційних матеріалів [14].

Продукти термічної переробки володіють значною універсальністю. Торф'яний кокс відрізняється низькою зольністю та стабільністю, торф'яний газ придатний для двигунів і турбін, а біоолії містять цінні хімічні фракції [15].

Історично масштабні проекти реалізовувалися в колишньому СРСР (1930-1950 рр.) з сухої перегонки торффу для потреб хімічної промисловості. У Фінляндії та Канаді в кінці XX століття були апробовані сучасні газифікаційні установки, які, однак, часто поступалися за економічними показниками переробці деревної біомаси, що підкреслює важливість регіонального економічного контексту для таких технологій [9, 16].

Біотехнологічна переробка – інтеграція торффу в циркулярну економіку. Біотехнологічні методи пропонують альтернативний, низькотемпературний шлях перетворення торффу, орієнтований на стійкість та замкнутість виробничих циклів.

Хоча торф володіє низькою власною біодеградуючою здатністю, він відіграє важливу роль у біогазових установках при спільному зброджуванні з легко-розкладними субстратами (гній, харчові відходи). Торф стабілізує процес, зв'язує амоній та важкі метали, підвищуючи екологічну безпеку [17]. В аеробних умовах торф слугує ефективним структурним матеріалом при компостуванні

органічних відходів, регулюючи вологість та аерацію, а також зв'язуючи запахи та токсини [18].

Також торф є багатим джерелом гумінових та фульвокислот – високомолекулярних сполук із ростостимулюючими, антиоксидантними та хелатуючими властивостями. Їхня екстракція (лужна, ферментативна) відкриває можливості для застосування в сільському господарстві, екології та навіть медицині [19, 20].

Загальні перспективи біотехнологічної переробки торфу пов'язані з його інтеграцією в концепцію біорефайнінгу – багатоцільових комплексів, де з сировини виробляються енергія (біогаз), добрива (компости, гумінові препарати) та цінні біохімікати. Це відповідає принципам циркулярної економіки, перетворюючи торф на ключовий елемент сталого управління ресурсами [21].

Порівняльний аналіз та роль торфу в сучасній енергетиці

Торф як енергетичний ресурс займає унікальне проміжне положення між відновлюваною біомасою та викопними видами палива. Його характеристики сильно варіюють залежно від типу залягання, вологості та способу переробки, що вимагає комплексного порівняння з іншими паливами за ключовими параметрами. Енергетична щільність торфу безпосередньо залежить від ступеня його підготовки:

- Фрезерний торф (сирий): 8–12 МДж/кг
- Висушений фрезерний торф: до 16 МДж/кг
- Торф'яні брикети/гранули: 16–19 МДж/кг

Як видно з таблиці 1, торф за енергетичною щільністю конкурує з бурим вугіллям та деревиною, але поступається кам'яному вугіллю та газу. Його ключовий екологічний виклик – значні викиди CO₂, порівнянні з вугіллям, оскільки при спалюванні вивільняється вуглець, накопичений в екосистемі за тисячі років [12, 22].

Таблиця 1

Порівняльні характеристики різних видів палива

Вид палива	Теплотворна здатність, МДж/кг	Зольність, %	Питомі викиди CO ₂ , кг/ГДж
Природний газ	38–50	0.1–0.5	56–58
Кам'яне вугілля	24–30	5–20	90–100
Буре вугілля	15–25	10–40	95–110
Торф (брикети)	16–19	2–10	100–110
Деревні гранули	16–18	0.5–3	~0 (умовно-нейтральні)*
Солома	14–15	4–9	~0 (умовно-нейтральні)*

Примітка: Умовно-нейтральні викиди CO₂ означають, що при спалюванні виділяється вуглець, акумульований протягом короткого циклу росту, а не геологічного часу.

З точки зору стійкості торф є повільно відновлюваним ресурсом, що ставить його в особливе положення. Його формування займає тисячоліття, анераціональний видобуток веде до деградації унікальних екосистем та викидів парникових газів.

Однак, за раціонального управління його використання може бути інтегроване в стійкі енергетичні стратегії. Ключові принципи такого підходу, розроблені в країнах Північної Європи, включають:

- 1) Обмеження видобутку на ділянках з високою природоохоронною цінністю.
- 2) Обов'язкову рекультивацію та обводнення відпрацьованих родовищ.
- 3) Використання торфу переважно у складі композитних палив з швидковідновлюваною біомасою [23].

У контексті переходу до низьковуглецевої економіки торф може відігравати допоміжну роль:

1. Як перехідне паливо: Заміщення вугілля, особливо в локальних системах теплопостачання, до переходу на повністю відновлювані джерела.
2. Як компонент циркулярної економіки: Участь у утилізації відходів (торфовідхідні брикети) та виробництві біодобрив.
3. Як стабілізатор біоенергетичних процесів: У біогазових установках та компостуванні.

Таким чином, екологічна прийнятність використання торфу залежить не стільки від факту його спалювання, скільки від способу видобутку, переробки та, що найважливіше, післяексплуатаційного відновлення торф'яних екосистем.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні **основні висновки**:

1. Встановлено багатовікову спадкоємність у використанні торфу як адаптивного енергоресурсу. Проведений аналіз виявив безперервну еволюцію від його епізодичного застосування неандертальцями та *Homo sapiens* у палеоліті, через становлення в якості базового палива в регіонах з дефіцитом деревини (Ірландія, Скандинавія) в аграрну епоху, до системної ролі в енергетиці промислової революції. Ця спадкоємність демонструє здатність людства адаптувати даний ресурс під змінні технологічні та економічні умови.

2. Виявлено ключові технологічні переходи, що визначили сучасний вигляд торф'яної енергетики. Головними з них стали: механізація видобутку (фрезерний спосіб), стандартизація палива (брикетування, гранулювання) та перехід від прямого спалювання до глибинної переробки. Найперспективнішим напрямом є створення композитних палив та інтеграція торфу в біотехнологічні процеси (анаеробне зброджування, біорефайнінг), що дозволяє підвищити ефективність та вирішити завдання утилізації відходів.

3. Визначено унікальне положення торфу в сучасній енергетиці як «повільно відновлюваного» ресурсу з подвійною екологічною роллю. З одного боку, його спалювання пов'язане з високими питомими викидами CO₂, подібними до вугілля. З іншого – за раціонального управління (стійкий видобуток, рекультивація, використання в якості компонента циркулярної економіки) торф може виконувати допоміжну функцію в переході до низьковуглецевої енергетики, особливо в якості місцевого палива та стабілізатора біоенергетичних процесів.

4. Доведено, що майбутнє торфу пов'язане не з масштабним прямим спалюванням, а з його багатофункціональною роллю в біоекономіці. Перспективи лежать в галузі комплексної переробки з отриманням енергії, біохімікатів (гумінові кислоти) та матеріалів, а також у використанні його сорбційних та структурних властивостей для вирішення екологічних завдань (ремедіація земель, утилізація відходів).

Перелік посилань

1. Karkanias, P., & Kyriakou-Apostolika, N. (2024). Revisiting palaeolithic combustion features of Theopetra Cave: A diachronic use of dung and peat as fuel. *Journal of Archaeological Science*, 165, 105958. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2024.105958>
2. Albert, R. M., Berna, F., & Goldberg, P. (2012). Insights on Neanderthal fire use at Kebara Cave (Israel) through high resolution study of prehistoric combustion features: Evidence from phytoliths and thin sections. *Quaternary International*, 247, 246–266. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.10.016>
3. Feehan, J. (2003). *The bogs of Ireland: An introduction to the natural, cultural and industrial heritage of Irish peatlands*. University College Dublin.
4. Borger, G. J. (1992). Draining–digging–dredging: The creation of a new landscape in the peat areas of the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, 22, 1–10.
5. Lappalainen, E. (Ed.). (1996). *Peat in Finland*. Finnish Peatland Society.
6. Särkelä, A. (2000). Peat production technology in Finland. *Suo*, 51(2), 49–56.
7. Kopetz, H. (2007). *Renewable energy in Europe: Markets, trends and technologies*. Springer.
8. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
9. Kurkela, E., Simell, P., & Ståhlberg, P. (2004). *Peat gasification in circulating fluidized bed gasifiers* (VTT Tiedotteet – Research Notes No. 2246). VTT Technical Research Centre of Finland.
10. Hiltunen, M., & Arpiainen, V. (2009). Co-combustion of peat and coal: Emissions and efficiency in a pilot-scale furnace. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 921–927. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.005>
11. Zhou, H., Wu, Y., & Cen, K. (2015). Experimental study on peat-coal-water slurry combustion. *Fuel*, 153, 510–517.
12. Alakangas, E., Vesterinen, P., & Hurskainen, M. (2006). *Solid biofuels for energy production: Handbook*. VTT Technical Research Centre of Finland.
13. Pikkarainen, T., Korpijärvi, K., & Järvinen, M. (2008). Fuel briquettes from peat and waste paper: Production and combustion properties. *Bioresource Technology*, 99(15), 7323–7329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.055>
14. Morf, P., Hasler, P., & Nussbaumer, T. (2002). Mechanisms and kinetics of hydrothermal carbonization of biomass. *Fuel*, 81(6), 843–853.
15. Oasmaa, A., Peacocke, C., & Gust, S. (2005). *A guide to physical properties and chemical composition of biomass-based pyrolysis oils* (VTT Publications No. 450). VTT Technical Research Centre of Finland.
16. Graham, R. (1985). *Peat and its uses in Canada*. Canadian Peat Resources Ltd.
17. Weiland, P. (2009). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
18. Tuomela, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 72(2), 169–183. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(99)00104-2)
19. Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

20. Peuravuori, J., & Pihlaja, K. (1997). Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances. *Analytica Chimica Acta*, 337(2), 133–149. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(96\)00412-6](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(96)00412-6)
21. Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421.
22. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
23. Joosten, H., Tapio-Biström, M.-L., & Tol, S. (2012). *Peatlands – guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use* (2nd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations and Wetlands International.
24. Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., & Stringer, L. (Eds.). (2008). *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*. Global Environment Centre and Wetlands International.
25. Leshtakov, A., Thiébault, S., & Vernet, J.-L. (1996). Coal used for fuel at two prehistoric sites in southern France: Les Canalettes (Mousterian) and Les Usclades (Mesolithic). *Journal of Archaeological Science*, 23(4), 509–512. <https://doi.org/10.1006/jasc.1996.0048>
26. McGovern, T. H., Perdikaris, S., & Tinsley, C. (2007). The economy of Norse Greenland. *Arctic Anthropology*, 44(1), 12–36.
27. Henry, A., & Théry-Parisot, I. (2014). Fuel use and management during the Mesolithic: Recent approaches in archaeobotany. *Palethnologie*, (6). <https://doi.org/10.4000/palethnologie.1304>
28. Sovijärvi, A. (1959). Peat as fuel in Finland. *Suo*, 10(1), 1–8.
29. Koponen, P., Luoma, S., & Hiltunen, M. (2004). Peat pellets as a renewable fuel: Combustion properties and emissions. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 541–550.

ABSTRACT

Purpose. The aim of this work is a comprehensive analysis of the centuries-long evolution of peat utilization technologies for energy needs – from ancient times to modern biorefining concepts – and an assessment of its prospects in the context of the bioeconomy and decarbonization.

Methodology. The research is based on a comprehensive interdisciplinary approach combining data from archaeology, history of technology, chemical technology, and ecology. Historical-genetic, comparative-technological, systemic analysis, and technical-economic methods were used. The source base consisted of archaeological reports, historical and ethnographic sources, modern scientific and technical literature, and reports from international organizations.

Results. The key stages of evolution have been established: from the use of peat by Neanderthals in the Paleolithic, through its role as a basic local fuel in agrarian societies, to the industrialization of extraction (milled peat, briquetting) in the 19th-20th centuries, and the transition to deep processing in the 20th-21st centuries. The latter stage includes the development of composite fuels (peat-coal mixtures, peat-water-coal slurries, peat-waste briquettes), thermal methods (pyrolysis, gasification, carbonization), and biotechnologies (anaerobic digestion, production of humic substances). The unique position of peat as a "slowly renewable" resource with a dual environmental role has been determined: significant CO₂ emissions during combustion, but potential for stabilizing bioenergy processes and integration into the circular economy under conditions of rational management and peatland restoration.

Scientific novelty. lies in the implementation of a comprehensive interdisciplinary approach to the history of peat energy. For the first time, a single line of evolution of peat use technologies – from Paleolithic fires to modern biorefining concepts – has been traced within one study, revealing stable patterns and technological paradigms of its development.

Practical significance. The research results provide a systematic basis for developing balanced regional programs for the use of peat resources. The article materials can be used by government authorities and energy companies to formulate strategies, by research organizations to determine priority areas for developing new processing technologies, and in the educational process for training specialists in the field of bioenergy and rational environmental management.

Keywords: *peat, energy history, fuel, thermal processing, biotechnology, renewable energy sources.*

дата першого надходження статті до видання	01.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	02.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	03.09.2025