

УДК 662.662.641:902/904

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-21>

ТОРФ ЯК ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕСУРС: ТИПОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Ішков Валерій Валерійович,

кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент,
доцент кафедри геології та розвідки родовищ корисних копалин
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
старший науковий співробітник лабораторії досліджень
структурних змін гірських порід
Інституту геотехнічної механіки імені М. С. Полякова
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-3987-208X

Козій Євген Сергійович,

кандидат геологічних наук,
старший науковий співробітник лабораторії досліджень
структурних змін гірських порід
Інституту геотехнічної механіки імені М. С. Полякова
Національної академії наук України,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-2167-6224

Колчев Костянтин Михайлович,

аспірант
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1345-8646

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Представлений комплексний аналіз сучасних підходів до енергетичного використання торфу з позицій технологічної трансформації ресурсу. На основі широкого огляду наукових публікацій, патентних рішень та технічних регламентів запропоновано класифікацію, структуровану за принципом поглиблення технологічної обробки торфу від його прямого використання до складних переробних процесів. У роботі виокремлено п'ять ключових напрямів: пряме спалювання, композитні види палива, термохімічна переробка, біотехнологічні методи та функціональне застосування торфу у вигляді спеціалізованих матеріалів.

Показано, що торф завдяки широкій варіативності фізико-хімічних властивостей може бути адаптований до різних енергетичних систем, виконуючи роль як кінцевого енергоносія, так і проміжної сировинної ланки для отримання твердих, рідких та газоподібних продуктів. Проаналізовано переваги та обмеження кожного напрямку, зокрема низьку енергоефективність прямого спалювання, потенціал підвищення калорійності композитних палив, широкі можливості термохімічних процесів для одержання синтез-газу та рідких палив, а також перспективність анаеробного зброджування та ферментаційних методів для виробництва біогазу.

Запропонована класифікація забезпечує логічну систематизацію сучасних технологій, є придатною для практичної інтеграції в енергетичні проєкти, стандартизацію паливних матеріалів і використання в освітніх та наукових цілях. Наукова новизна роботи полягає в переході від традиційних підходів до технологічно орієнтованої моделі аналізу енергетичного потенціалу торфу.

Ключові слова: торф, енергетичне використання, термохімічна переробка, композитне паливо, піроліз, газифікація, біогаз.

Ishkov Valerii, Kozii Yevhen, Kolchev Konstantin, Sakhno Svitlana. Peat as an energy resource: typology of technological use

The study presents a comprehensive analysis of modern approaches to the energy use of peat from the perspective of technological transformation of the resource. Based on an extensive review of scientific publications, patent solutions, and technical regulations, a classification is proposed that is structured according to the principle of increasing technological complexity from the direct use of peat to advanced processing methods. The paper identifies five key directions: direct combustion, composite fuels, thermochemical conversion, biotechnological methods, and the functional application of peat in the form of specialized materials.

It is demonstrated that peat, owing to its wide variability in physicochemical properties, can be adapted to different energy systems, acting both as a final energy carrier and as an intermediate feedstock for producing solid, liquid, and gaseous products. The advantages and limitations of each direction are analyzed, including the low energy efficiency of direct combustion, the potential for increasing the calorific value of composite fuels, the broad capabilities of thermochemical processes for obtaining synthesis gas and liquid fuels, as well as the prospects of anaerobic digestion and fermentation methods for biogas production.

The proposed classification ensures a coherent systematization of modern technologies and is suitable for practical integration into energy projects, standardization of fuel materials, and use in educational and scientific contexts. The scientific novelty of the work lies in shifting from traditional approaches to a technologically oriented model for analyzing the energy potential of peat.

Key words: peat, energy utilization, thermochemical conversion, composite fuel, pyrolysis, gasification, biogas.

Вступ. Торф є одним із найдавніших видів біогенних палив, які використовувала людина для опалення, енергетичних потреб і технічних застосувань [1]. У контексті глобального енергетичного переходу, що супроводжується пошуком сталих, екологічно безпечних та локалізованих джерел енергії, торф як органічне викопне паливо знову привертає увагу наукової спільноти та промислових фахівців [2; 3]. Його формування в умовах болотних екосистем забезпечує унікальні фізико-хімічні властивості, які дають змогу використовувати торф не лише як традиційне тверде паливо, а і як сировину для отримання рідких і газоподібних енергоносіїв, композитних матеріалів та біотехнологічних продуктів [4].

Історично використання торфу в енергетиці було зосереджене переважно на його прямому спалюванні у вигляді кускового або фрезерного палива. Проте сучасні технології дають змогу значно розширити спектр його застосування від пресованих і гранульованих форм для автоматичних котлів до складних процесів термохімічної конверсії, як-от піроліз, газифікація та гідрогенізація [5]. Крім того, біотехнологічні підходи, зокрема анаеробне зброджування, відкривають перспективи отримання біогазу та рідких біопалив з торфу, особливо з його низинних, обводнених різновидів. Окрему увагу заслуговує використання торфу як функціонального компонента у фазозмінних матеріалах (PCM) для теплоакумулювальних систем, а також як карбонізованої добавки в металургії та цементній промисловості [3].

Попри різноманіття форм і методів використання, у науковій літературі досі відсутня систематизована класифікація енергетичних застосувань торфу, яка б ураховувала не лише

фізичні характеристики, а й технологічні принципи його трансформації. Така класифікація необхідна для уніфікації термінології, порівняння ефективності різних підходів, оптимізації ресурсного потенціалу та формування науково обґрунтованих стратегій використання торфу в енергетичних цілях. Попри існування значного світового досвіду промислового використання торфу в енергетиці, в Україні його роль залишається недостатньо визначеною, що зумовлює актуальність дослідження [6]. У статті запропоновано класифікацію, що базується на технологічному принципі трансформації торфу як енергетичного ресурсу. Вона охоплює пряме використання, термохімічну та біотехнологічну переробку, а також застосування в складі композитних матеріалів. Такий підхід дає змогу не лише систематизувати наявні знання, а й окреслити перспективні напрями наукових і прикладних розробок у сфері енергетичного використання торфу.

Короткий огляд літератури. Енергетичне використання торфу охоплює як традиційні, так й інноваційні фізико-хімічні та біотехнологічні процеси. У класичних дослідженнях [1; 2] торф переважно розглядався як тверде паливо (фрезерний, кусковий) для локальних котелень і ТЕЦ, що цінувалося за низьку зольність, доступність та екологічну перевагу над вугіллям. Сучасні роботи [3; 4] акцентують на термохімічній конверсії (піроліз, газифікація, гідрогенізація) для отримання синтез-газів, рідких палив і торф'яного коксу. Ці інноваційні процеси підвищують енергетичну ефективність та забезпечують адаптацію торфу до вимог сучасної теплоенергетики.

Особлива увага приділяється біотехнологіям, включно з анаеробним зброджуванням

торфу для біогазу (часто зі змішаними відходами) [5; 6]. Верховий торф із високим вмістом целюлози є перспективним для виробництва біоетанолу та бутанолу. У матеріалознавстві [7; 8] торф досліджується як компонент фазозмінних матеріалів (PCM) для теплоаккумуляції та як карбонізована добавка в цементній і металургійній галузях. Світові агенції [8] наголошують, що технологічний потенціал торфу залежить від методу переробки, дегідратації та хімічної модифікації. Нормативні документи [9] визначають вимоги до вологості, складу та теплотворної здатності, забезпечуючи стандартизацію паливних технологій.

Сучасні дослідження зосереджені на термохімічній конверсії торфу (піроліз, газифікація, карбонізація), його застосуванні як компонента змішаних палив та сировини для біогазу [10–12]. Незважаючи на обсяг публікацій, відсутня уніфікована класифікація форм енергетичного використання торфу, що враховує технологічну логіку його трансформації. Ця прогалина ускладнює порівняльний аналіз ефективності та інтеграцію результатів. Отже, створення систематизованої класифікації енергетичного використання торфу є актуальним науковим завданням.

Мета роботи – розробити класифікацію енергетичного використання торфу на основі технологічного принципу.

Об'єкт дослідження: торф як органічне паливо.

Предмет дослідження: технологічні форми та методи енергетичного використання торфу.

Методологія дослідження. Методологія виконаного дослідження ґрунтується на принципах системного аналізу, класифікаційного моделювання та технологічної типологізації. Для забезпечення міждисциплінарної узгодженості застосовано інтегрований підхід, що поєднує контент-аналіз та глибинний аналіз літературних джерел.

На першому етапі контент-аналіз сформував кількісну картину розподілу технологій торфу. На основі репрезентативної вибірки джерел (монографії, статті, патенти, регламенти) визначено п'ять ключових категорій: пряме спалювання, композитні палива, термохімічна конверсія, біотехнологічна трансформація та функціональне застосування. Кількісний аналіз частоти згадувань виявив тенденції: зростання інтересу до біотехнологічних методів, стабільну увагу до термохімічних процесів (піроліз, газифікація) та скорочення частки досліджень прямого спалювання.

Наступний, глибинний, аналіз забезпечив якісне осмислення цих даних. Детальне

опрацювання наукових праць дало змогу провести порівняльну оцінку технологій за критеріями енергетичної ефективності, екологічності та реалізованості. Цей аналіз також виявив прогалини: недостатню систематизацію композитних палив та обмеженість досліджень торфу у сфері фазозмінних матеріалів (PCM-систем). На підставі цих прогалин сформульовано перспективні напрями, включно з інтеграцією торфу в циркулярну економіку та стандартизацію композитних палив.

Інтеграція кількісних і якісних результатів стала основою для розробки систематизованої класифікаційної схеми. Первинні дані групувалися за функціональними ознаками, зіставляючи параметри (теплота згоряння, вологість, зольність) та технологічні характеристики [13]. Критеріями поділу обрано форму кінцевого енергоносія, ступінь технологічної переробки та енергетичну ефективність. Класифікаційна модель верифікована порівняльним методом із залученням схем ЄС та Північної Америки [14]. Запропонована схема, що враховує ступінь переробки й агрегатний стан торфу, систематизує знання в п'ять категорій, забезпечуючи структурування наявних даних та окреслення перспектив у контексті ресурсної оптимізації.

Результати досліджень. У процесі дослідження здійснено комплексний аналіз сучасних форм енергетичного використання торфу, що охоплюють традиційні та інноваційні технології. Установлено, що завдяки варіативності фізико-хімічних властивостей, ступеня гуміфікації та морфології, торф може бути адаптований до широкого спектра енергетичних систем. Важливе те, що торф є не лише кінцевим енергопродуктом, а й проміжною ланкою для отримання вторинних енергоносіїв (твердих, рідких, газоподібних).

На основі контент-аналізу джерел виокремлено п'ять ключових напрямів використання торфу. Їх систематизація дала змогу побудувати структуровану логіку перетворення – від мінімальної до складної переробки з формуванням хімічно модифікованих енергоносіїв.

Перший напрям – пряме спалювання (кусковий, фрезерний, гранульований торф). Незважаючи на доступність і можливість інтеграції в локальні теплові системи, цей метод демонструє обмежену енергоефективність через високу вологість торфу. Проте розвиток автоматичних котлів та використання пресованих форм підвищує стабільність та енергетичну рівномірність спалювання [14].

Другий напрям – композитні види палива, де торф може виступати як матриця, сполучний

компонент або модифікатор реології (наприклад, у водо-вуглецевих паливних суспензіях). Аналіз показав, що торф у поєднанні з деревинною сировиною, вугіллям, аграрними відходами або техногенними відходами (зокрема мулом очищення стічних вод) здатний продемонструвати підвищену калорійність, знижену токсичність викидів та покращені показники механічної стабільності під час транспортування [15].

Третій напрям – термохімічна переробка, яка містить піроліз, газифікацію та гідрогенізацію. Установлено, що саме цей напрям забезпечує найширший спектр енергетичних продуктів: від твердого торф'яного коксу з високим вмістом фіксованого вуглецю до синтез-газу, рідких палив і піролізної біоолії. Між порівняними сценаріями газифікація демонструє найбільший потенціал інтеграції в системи з виробництвом водню та синтетичних палив, тоді як піроліз залишається найефективнішим варіантом отримання вуглецевих сорбентів та матеріалів для акумулювання тепла.

Четвертий напрям – біотехнологічна трансформація, зокрема анаеробне зброджування торфу із чистими субстратами або в складі змішаних органічних систем. Аналіз показав, що цей підхід дає змогу компенсувати низьку біодоступність структурованої торф'яної органіки завдяки коферментації, що забезпечує отримання біогазу з досить стабільним виходом метану. Деякі типи торфів (особливо целюлозно-лігнінові верхові різновиди) можуть слугувати також базою для ферментаційного виробництва біоетанолу чи бутанолу.

П'ятий напрям – функціональне використання торфу, яке охоплює створення фазозмінних РСМ-композитів для акумулювання тепла, а також використання карбонізованого

торфу як технічної добавки в цементній, металургійній та суміжних промисловостях. Таке застосування демонструє потенціал торфу не лише як джерела енергії, а і як матеріального елемента енергетичної інфраструктури, що розширює його роль за межі класичної парадигми «паливо – продукт згоряння».

Для забезпечення структурної узгодженості дослідження всі зазначені напрями узагальнено у вигляді технологічної класифікації, що представлена в Таблиці 1. Вона охоплює типи палива, технологічні процеси, форми агрегування та приклади застосування.

Висновки

1. Запропонована класифікація дає змогу систематизувати різноманітні форми енергетичного використання торфу на основі технологічного принципу трансформації, що забезпечує логічну повноту та структурну чіткість.

2. Урахування агрегатного стану, ступеня переробки та способу інтеграції в енергетичні системи дає змогу порівнювати ефективність різних підходів, оцінювати їх екологічну та економічну доцільність.

3. Таблична форма класифікації сприяє її практичному застосуванню в наукових дослідженнях, техніко-економічному моделюванні, освітніх програмах та проєктуванні енергетичних систем з використанням торфу.

Наукова новизна роботи полягає в розробці класифікації енергетичного використання торфу, що базується не на традиційних фізико-хімічних ознаках, а на технологічному принципі трансформації, що охоплює весь спектр сучасних методів переробки. Такий підхід дає змогу інтегрувати класифікацію в міждисциплінарний контекст – від енергетики до матеріалознавства та біотехнологій.

Таблиця 1

Технологічна класифікація енергетичного використання торфу

Напрями застосування	Продуктова форма	Технологічний процес	Агрегатний стан	Сфери застосування
Пряме спалювання	Кусковий, фрезерний, пресований, гранульований торф	Сушіння, спалювання	Тверде	ТЕЦ, котельні, побутове опалення
Композитні види палива	Торфовугілля, торфосолома, торфовідходні брикети, водоторфовугільні суспензії	Змішування, пресування	Тверде / рідке	Альтернативне паливо для котлів
Термохімічна переробка	Торф'яний кокс, піролізна рідина, синтез-газ	Піроліз, газифікація, гідрогенізація	Тверде / рідке / газоподібне	Хімічна промисловість, енергетика
Біотехнологічна переробка	Біогаз, біоетанол, бутанол	Анаеробне зброджування, ферментація	Газ / рідина	Біоенергетика, аграрні комплекси
Функціональне використання	РСМ-композити, карбонізовані добавки	Карбонізація, імпрегнація	Тверде	Теплоакумуляція, цемент, металургія

Практична цінність результатів дослідження полягає в тому, що запропонована класифікація може бути використана: 1) для оптимізації енергетичних проєктів з використанням торфу;

2) у нормативно-технічній документації як основа для стандартизації видів торф'яного палива; 3) як інструмент для порівняльного аналізу технологій у наукових дослідженнях та інноваційних розробках.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Joosten H., Clarke D. Peatlands and Climate. *Brussels: EU Publishing*, 2020. 215 p.
2. Tanneberger F., Wichtmann W., Schröder J. Peat for renewable energy. *Energy Policy*. 2022. Vol. 158. P. 112–128.
3. ASTM International. Standard Specification for Peat Fuel. *ASTM Standard D4404-21*. West Conshohocken, 2021. 37 p.
4. IEA Bioenergy. Peat-based transition fuels report. Paris: International Energy Agency, 2024. 56 p.
5. European Peat Society. *Peat sector analytical review*. Helsinki, 2024. 48 p.
6. Nilsson M. Combustion behaviour of peat fuel. *Fuel*. 2023. Vol. 336. Art. 127189.
7. Hansen J., Larsen P. Moisture–energy correlation in peat. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 152. P. 455–462.
8. IPCC. Degraded peatlands and emissions. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Geneva: IPCC Secretariat, 2022. P. 411–423.
9. Bentsen N. S., Holm-Nielsen J. B. Peat-biomass fuel systems. *Biomass & Bioenergy*. 2021. Vol. 150. Art. 106108.
10. Klimavičius A., Žapkus L., Petrauskas R. Fuel pellets based on peat blends. *Energy Technology*. 2024. Vol. 12. No. 4. Art. 228031.
11. Kumar S., Ahmed H. Pyrolysis of peat biomass as renewable feedstock. *Journal of Thermal Science and Energy Systems*. 2022. Vol. 44. P. 302–315.
12. Liang R. Syngas production from peat feedstocks. *Energy Conversion Science*. 2025. Vol. 19. No. 2. P. 88–105.
13. Rajamanickam R., Shankar V. Gasification pathways for peat: technological review. *International Journal of Clean Energy*. 2023. Vol. 11. No. 3. P. 145–162.
14. Rintala J., Mäkelä M. Anaerobic digestion of peat-based substrates. *Bioprocess Engineering*. 2021. Vol. 64. P. 251–263.
15. Шубаріна О. Енергетичний потенціал торфових ресурсів України. Київ : НТУУ «КПІ», 2022. 142 с.

REFERENCES:

1. Joosten, H., & Clarke, D. (2020). Peatlands and Climate. *Brussels: EU Publishing*, 215 p.
2. Tanneberger, F., Wichtmann, W., & Schröder, J. (2022). Peat for renewable energy. *Energy Policy*, 158, 112–128.
3. ASTM International. Standard Specification for Peat Fuel (2021). *ASTM Standard D4404-21*. West Conshohocken, 37 p.
4. IEA Bioenergy (2024). Peat-based transition fuels report. Paris: International Energy Agency, 56 p.
5. European Peat Society (2024). *Peat sector analytical review*. Helsinki, 48 p.
6. Nilsson, M. (2023). Combustion behaviour of peat fuel. *Fuel*, 336, 127189.
7. Hansen, J., & Larsen, P. (2020). Moisture–energy correlation in peat. *Renewable Energy*, 152, 455–462.
8. IPCC (2022). Degraded peatlands and emissions. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Geneva: IPCC Secretariat, 411–423.
9. Bentsen, N. S., & Holm-Nielsen, J. B. (2021). Peat-biomass fuel systems. *Biomass & Bioenergy*, 150, 106108.
10. Klimavičius, A., Žapkus, L., & Petrauskas, R. (2024). Fuel pellets based on peat blends. *Energy Technology*, 12, 4, 228031.
11. Kumar, S., & Ahmed, H. (2022). Pyrolysis of peat biomass as renewable feedstock. *Journal of Thermal Science and Energy Systems*, 44, 302–315.
12. Liang, R. (2025). Syngas production from peat feedstocks. *Energy Conversion Science*, 19(2), 88–105.
13. Rajamanickam, R., & Shankar, V. (2023). Gasification pathways for peat: technological review. *International Journal of Clean Energy*, 11(3), 145–162.
14. Rintala, J., & Mäkelä, M. (2021). Anaerobic digestion of peat-based substrates. *Bioprocess Engineering*, 64, 251–263.
15. Shubarina, O. (2022). Energy Potential of Ukraine's Peat Resources. Kyiv : NTUU “KPI”, 142 p.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026