

П. П. КАРНОЖИЦЬКИЙ, Д. В. МІРОШНИЧЕНКО, П. В. КАРНОЖИЦЬКИЙ, К. Є. РУДНЄВА

РОЗРОБКА ПІЛОТНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РОЗЧИНУ ГУМАТІВ З БУРОГО ВУГІЛЛЯ

Буре вугілля є однією з найпоширеніших корисних копалин України. Розвідані запаси вугілля складають близько 3 млрд т. Глибина залягання вугілля не перевищує кількох десятків метрів, що суттєво полегшує його видобування. Основним недоліком українського бурого вугілля є його підвищена вологість (більш ніж 50 %) та зольність (20-30 %). Це робить нерентабельним енергетичне використання вугілля, зокрема, його газифікацію. Водночас, вугілля Дніпровського буровугільного басейну відрізняються високим вмістом гумінових кислот (близько 80% на органічну масу вугілля). Гумінові кислоти (ГК) – це фракція гумінових речовин, розчинна в слабких лужних розчинах, що є їх цінним компонентом. Отримані гумінові речовини можуть бути використані у сільському господарстві та хімічній промисловості. Вони забезпечують покращення якості ґрунту, збільшення врожаю та зниження використання хімічних добрив, що дозволяє зменшити вплив землеробства на довкілля. ГК також виконують важливі функції в промисловості та охороні навколишнього середовища. Особливе значення тут має очищення природних та стічних вод, а також рекультивація забрудненого ґрунту. Ефективність процесу виділення гумінових кислот з вугілля багато в чому визначається умовами контакту вугільних частинок з лужним розчином. Для вивчення процесу переробки бурого вугілля та досягнення максимального виділення розчинної частини запропоновано пілотну установку, основним апаратом якої є гідрокавітатор. Він забезпечує майже повне виділення гумінових речовин при незначному часі обробки. В статті приведені основні характеристики роботи окремих частин установки, визначені енергетичні витрати.

Ключові слова: буре вугілля; гумінові кислоти; гумати; гідрокавітатор; гідрокавітаційна активація

P. P. KARNOZHITSKYI, D. V. MIROSHNYCHENKO, P. V. KARNOZHITSKYI, K. Ye RUDNEVA

DEVELOPMENT OF A PILOT-SCALE INSTALLATION FOR OBTAINING HUMATE SOLUTIONS FROM LIGNITE

Brown coal is one of the most widespread mineral resources in Ukraine, with explored reserves estimated at approximately 3 billion tonnes. The depth of coal deposits does not exceed several dozen meters, which significantly facilitates its mining. The main drawback of Ukrainian brown coal is its high moisture content (more than 50%) and ash content (20-30%). This makes the energy use of brown coal, in particular its gasification, unprofitable. At the same time, brown coal from the Dnipro basin is characterized by a high content of humic acids (about 80% of the organic mass of coal). Humic acids (HAs) are a fraction of humic substances soluble in weak alkaline solutions, which is their valuable component. The obtained humic substances can be used in agriculture and chemical industry. They ensure improved soil quality, increased yields, and reduced use of chemical fertilizers, which allows reducing the impact of agriculture on the environment. HAs also perform important functions in industry and environmental protection. Of particular importance here is the purification of natural and wastewater, as well as the remediation of contaminated soils. The efficiency of the humic acid extraction process from brown coal is largely determined by the conditions of contact between coal particles and the alkaline solution. To study the brown coal processing and achieve maximum extraction of the soluble fraction, a pilot plant has been proposed, the main apparatus of which is a hydrocavitator. It ensures almost complete extraction of humic substances with minimal processing time. The article presents the main characteristics of the operation of individual parts of the plant, and the energy consumption is determined.

Key words: brown coal; humic acids; humates; hydrocavitator; hydrocavitation activation.

Вступ. Буре вугілля є одним з найбільш поширених різновидів твердих горючих копалин [1]. Це умовно перехідна форма від торфу до кам'яного вугілля [2]. Воно має високу гігроскопічність [3, 4], незначну твердість [4], колір від світлобурого до майже чорного. Це – «наймолодший» вид вугілля, що утворено шляхом вуглефікації. Буре вугілля має низьку калорійність порівняно з іншими видами вугілля, а також вищий вміст води та водню [3, 5]. Цей вид вугілля відрізняється від кам'яного вугілля своїми фізичними та хімічними властивостями.

Буре вугілля можна розділити на землисте та щільне (блискуче) [6], що відрізняються один від одного, перш за все, вмістом гумінових кислот (ГК). Для першого типу вугілля цей показник може перевищувати 80 % (у перерахунку на органічну масу), а для другого типу він знаходиться на рівні 10 %. Українське буре вугілля Дніпровського буровугільного басейну (Дніпробасу) представлене, в основному, землистим вугіллям. Відповідно, потенціал ГК для цього басейну достатньо великий [7].

Гумінові кислоти є основною фракцією гумінових речовин, що являють собою основу органічної маси землистого бурого вугілля. Це природні полімерні сполуки. ГК мають широкий спектр дії, виконуючи багато життєзабезпечувальних функцій в екосистемах Землі [8]. Вони відіграють ключову роль у підтриманні здоров'я ґрунтів, суттєво впливаючи на їхню родючість, колообіг поживних речовин та загальний екологічний стан [9]. Гумінові кислоти проявляють свою дію в багатьох сферах нашого життя. Важливою їх здатністю є зв'язувати нерозчинні іони металів, оксиди та гідроксиди, а також вивільняти їх знову протягом тривалого проміжку часу якщо це необхідно. ГК з'являються у дедалі більшій кількості досліджень та знаходять способи їх практичного застосування [3, 7, 10], зокрема, в аграрній галузі, медицині та охороні навколишнього середовища. Новим перспективним напрямком, що активно розвивається в Україні, є вивчення можливості використання гумінових кислот в полімерній інженерії, наприклад, як модифікаторів біодеградуючих полімерів (БП) [11], отримання за

допомогою застосування ГК екологічно безпечних гідрогелевих плівок [12], та ін.

Гумінові речовини – це клас природних поліфункціональних сполук, які не мають постійного хімічного складу, та утворених з рослинних та мікробних залишків [13]. Незважаючи на 200-річну історію вивчення, структура гумінових речовин залишається невстановленою через складність і мінливість складу в часі, пояснюваних стохастичною природою процесів гуміфікації, що реалізуються за принципом природного відбору сталих структур.

На сьогодні вчені зійшлися у думці, що гумінові речовини являють собою складні гетерогенні суміші полідисперсних матеріалів змінного складу, стійкі до біодеструкції. Важливими компонентами, що беруть участь у процесі гуміфікації є лігнін рослин та продукти його перетворення, полісахариди, меланін, кутин, білки, нуклеїнові кислоти та ліпіди. Існує загальноприйнята класифікація гумінових речовин, заснована на розчинності у розчинниках різної природи. Відповідно до цієї класифікації виділяють фульвові кислоти (ФК) – фракцію гумінових речовин, розчинну у воді за будь-яких значень рН, та гумінові кислоти – фракцію гумінових речовин, розчинну у лужних та нейтральних середовищах, що випадає в осад при підкисленні середовища до значень $\text{pH} < 2$, а також гумін – нерозчинний залишок, що не витягується [8].

Варто зазначити, що гумінові та фульвокислоти об'єднуються під загальною назвою гумусових кислот. Вони є найбільш рухливими та реакційно здатними складниками гумінових речовин, що беруть активну участь у хімічних процесах в екосистемах. У ряді випадків поділу ГК та ФК не проводять. Одночасно з цим ГК складають більшу частину гумусових кислот, і, зважаючи на простоту їх переведення у тверду фазу, є об'єктом більш інтенсивного вивчення (рис. 1).

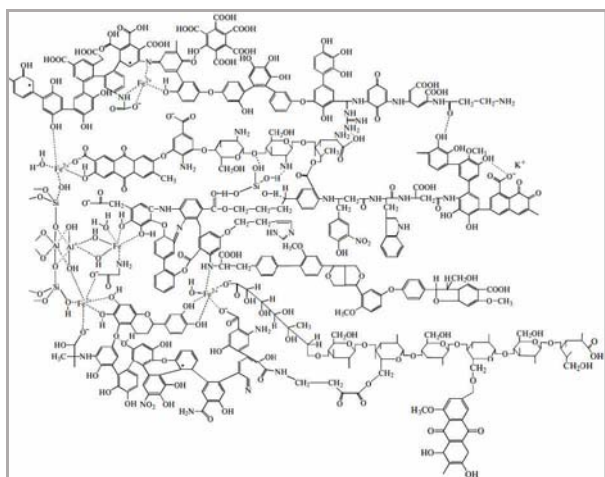


Рис. 1 - Гіпотетичний фрагмент структури молекули гумінових кислот по Кляйнхемпелю [7, 14]

Загальною для більшості моделей є наявність двох складових: каркасної (ароматичний вуглецевий скелет, заміщений функціональними групами, з

перевагою карбоксильних, гідроксильних та метоксильних) та неупорядкованої периферійної частини, що включає полісахаридно-поліпептидні та інші фрагменти. На сьогоднішній день подібні моделі знаходять застосування як базові для математичного моделювання структури гумінових кислот. Слід зазначити, що застосування ГК для збільшення продуктивності ґрунтів відбувається у вигляді їх натрієвих або калієвих солей – гуматів. Гумати легко розчиняються у воді, що полегшує їх практичне використання, в т.ч. в сільському господарстві [15-17]. Вугілля Дніпробасу залягають на площі 100 тис. км² й розташовані у 80 окремих родовищах. Вони відрізняються одне від одного за властивостями, хімічним складом, в т.ч. за складом гумінових кислот. Відповідно, й умови виділення останніх залежать від властивостей та складу похідного вугілля.

Мета статті - розробка пілотної установки для отримання розчину гуматів з бурого вугілля.

Матеріали та методи дослідження. Для відпрацювання технологічних параметрів процесу виділення ГК запропоновано пілотну установку, що дозволяє оцінювати глибину виділення гумінових кислот з бурого вугілля та визначати основні параметри процесу екстракції.

Результати та їх обговорення. Технологічна схема (рис. 2) виробництва гуматів з бурого вугілля базується на екстракції гумінових кислот із вугілля за допомогою лужних розчинів.

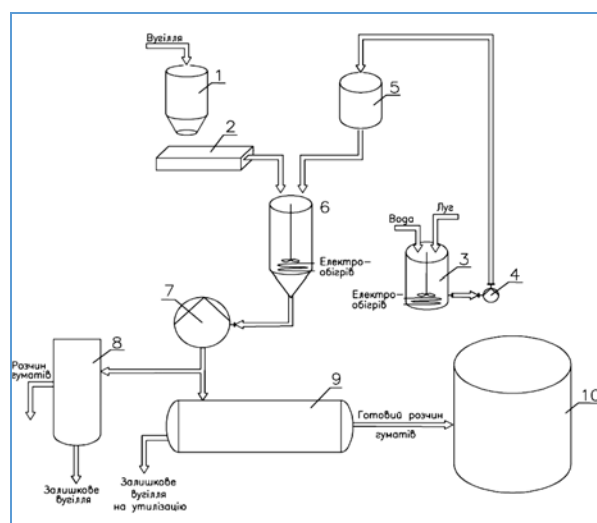


Рис. 2 - Технологічна схема установки з переробки бурого вугілля для отримання гуматів:

1 – бункер для вугілля (1 м³), 2 – дозатор вугілля, 3 – ємність для приготування лужного розчину (1,5-2 м³), 4 – насос (подача 1000 л розчину), 5 – мірик для лужного розчину (1 м³), 6 – апарат для приготування пульпи (1,5-2 м³), 7 – кавітатор, 8 – декантер (1,5 м³), 9 – осадна центрифуга, 10 – ємність для розчину гуматів (2 м³)

Схема включає кілька основних етапів: підготовку сировини, екстракцію гумінових кислот, диспергування, відстоювання, фільтрацію та отримання кінцевого продукту. У процесі

використовується спеціалізоване обладнання для забезпечення необхідних умов реакції, що дозволяє досягти високої ефективності вилучення гумінових кислот. Важливою ланкою даної схеми є кавітатор. Важливість гідрокавітаційної обробки бурого вугілля при виділенні з них ГК вивчено більш детально у попередньому дослідженні [18]. Варто зазначити, що дослідження впливу гідрокавітаційної активації як методу попередньої обробки або окремої технології поводження з різними матеріалами (кам'яним вугіллям, біомасою, фільтратами сміттєзвалищ, стічними водами, торфом і рештками агрокультур та ін.) все частіше з'являються в літературних джерелах [19-26], але при цьому роботи з вивчення гідрокавітаційної обробки бурого вугілля на сьогодні день практично відсутні.

Основною сировиною є повітряно-сухе буре вугілля, подрібнене до крупності 1-0 мм або 3-0 мм. Перед завантаженням до технологічного процесу вугілля проходить сортування та перевірку крупності за допомогою сита. Для зберігання подрібненого вугілля використовується бункер (1), який вміщує до 500 кг повітряно-сухої вугільної шихти. Дозатор (2) забезпечує точну подачу вугілля в кількості 100 кг на цикл, працює під контролем автоматичних систем і забезпечує рівномірну подачу сировини.

Для приготування лужного розчину застосовується ємність (3), обладнана мішалкою та електричним нагрівачем для підігріву до температури 40°C. Розчин готується шляхом змішування NaOH із водою у співвідношенні 15–20%. Насос (4) транспортує готовий розчин у мірник (5) для подальшого дозування.

Подрібнене вугілля дозатором завантажується в екстрактор (6), у якому підтримується температура 40°C. До екстрактора додається лужний розчин, що забезпечує формування пульпи із вмістом 70–80% рідини та 20–30% твердої фази. Процес екстракції триває 1–2 години при постійному перемішуванні, що забезпечує рівномірний контакт твердої фази з лужним розчином. На цьому етапі відбувається вилучення гумінових кислот із сировини.

Пульпа з екстрактора надходить у кавітатор (7) для диспергування та додаткового подрібнення твердої фази. Використання високочастотної кавітації сприяє максимальному вивільненню гумінових речовин. Після цього пульпа транспортується до декантатора (8), де відбувається розділення розчину гуматів і залишкового вугілля під дією гравітаційних сил.

Для остаточного розділення пульпи застосовується осаджувальна центрифуга (9), яка забезпечує відокремлення очищеного розчину гуматів і залишків вугілля. Очищений розчин збирається у спеціальних ємностях із нержавіючої сталі (9), які забезпечують збереження продукції при температурі навколишнього середовища.

Технологічний процес контролюється на ключових етапах. При приготуванні розчину вимірюється температура та pH за допомогою

лабораторного pH-метра. У процесі екстракції температура контролюється термopарами, а на етапі отримання готової продукції вимірюються pH і концентрація гуматів за допомогою спектрофотометра. Для автоматизації процесу використовуються датчики рівня рідини, температури та автоматичні дозатори реагентів. Енергетичні витрати для виробництва гуматів включають споживання 1,2–1,5 тонн бурого вугілля, 0,3–0,5 тонн лужного розчину та 150–200 кВт·год електроенергії на кожен тону продукції.

Технологічна схема установки для виробництва гуматів з бурого вугілля забезпечує економічно ефективний і екологічно безпечний спосіб отримання цього цінного продукту. Процес включає підготовку сировини, екстракцію гумінових кислот, очищення та формування кінцевого продукту. Використання сучасного обладнання та контроль параметрів на кожному етапі дозволяють отримати гумати високої якості з мінімальним впливом на довкілля.

Висновки. Ефективність процесу виділення гумінових кислот з вугілля багато в чому визначається умовами контакту вугільних частинок з лужним розчином. Для вивчення процесу переробки бурого вугілля та досягнення максимального виділення розчинної частини запропоновано пілотну установку, основним апаратом якої є гідрокавітатор. Він забезпечує майже повне виділення гумінових речовин при незначному часі обробки. В статті приведені основні характеристики роботи окремих частин установки, визначені енергетичні витрати. Розробка мобільних пілотних установок з отримання розчинів гуматів з бурого вугілля можна використовувати для:

1. Наробітки дослідних партій розчинів гуматів.
2. Встановлення основних параметрів роботи окремих агрегатів установки.
3. Для оптимізації роботи установки в цілому.

Список літератури

1. Melnikov A., Miroshnychenko D., Karnozhyskyi P.P., Karnozhyskyi P.V. Sorption properties of brown coal processing products. *Chem. Chem. Technol.* 2024, vol. 18, no. 4, pp. 493–501. <https://doi.org/10.23939/chcht18.04.493>
2. Vorres K. S. *Lignite and Brown Coal*. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons Inc, 2010. 29 p. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1209071422151818.a01>
3. Світлий Ю. Г., Круть О. А., Білецький В. С. Вітчизняний досвід переробки бурого вугілля на водовугільне паливо // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2013. Т. 2. № 2. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ETRS_2013_2_3
4. Білецький В. С. Вугілля буре // Велика українська енциклопедія. URL: https://vue.gov.ua/Вугілля_буре (дата звернення: 03.03.2025).
5. Belov O., Shustov O., Adamchuk A., Hladun O. Complex Processing of Brown Coal in Ukraine: History, Experience, Practice, Prospects // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 251–268. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.251>
6. Смирнов В. О., Сергеев П. В., Білецький В. С. Технологія збагачення вугілля: навч. посібник / Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2011. – 474 с.
7. Сініцина А. О., Карножицький П. П. Буре вугілля – сировина для отримання водорозчинних сорбентів // *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. Т. 3. С. 67–77. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.06>

8. Яшук В. У., Корецький А. П., Ковбасенко Р. В., Дмитрієв О. П., Ковбасенко В. М. Гумінові речовини – безпечні регулятори екосистем. Київ: Національна академія аграрних наук України, 2016. 89 с.
9. Maffia A., Oliva M., Marra F., Mallamaci C., Nardi S., Muscolo, A. Humic Substances: Bridging Ecology and Agriculture for a Greener Future. *Agronomy* 2025, vol. 15, no. 2, p. 410. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy15020410>
10. Shah M., Rodriguez-Couto S., Kumar V. *New Trends in Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater*. 1st Edition. Netherlands: Elsevier, 2021. 748 p. <http://dx.doi.org/10.1016/C2019-0-04585-2>
11. Lebedev V., Miroshnichenko D., Vytrykush N., Pyshyev S., Masikeyvych A., Filenko O., Tsereniuk O., Lysenko L. Novel biodegradable polymers modified by humic acids. *Mater. Chem. Phys.* 2023, vol. 313, p. 128778. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128778>
12. Miroshnichenko D., Lebedeva K., Cherkashina A., Lebedev V., Tsereniuk O., Krygina N. Study of hybrid modification with humic acids of environmentally safe biodegradable hydrogel films based on hydroxypropyl methylcellulose. *C.* 2022, vol. 8, no. 4, p. 71. doi: 10.3390/c8040071
13. Mahler C. F., Svierzoski N. D. S., Bernardino C. A. *Chemical Characteristics of Humic Substances in Nature*. In Humic Substances. IntechOpen, 2021; pp. 139–153. <https://doi.org/110.5772/intechopen.97414>
14. Tipping E. *Cation binding by humic substances*. Cambridge Environmental Chemistry Series. No. 11. UK: Cambridge University Press, 2004. 434 p.
15. Плетень В. В. Гумати – новий метод у регулюванні продуктивності // Наукові записки ЦНТУ. 2018. № 23. С. 164–168.
16. Рильський О. Ф., Петруша Ю. Ю., Домбровський К. О., Охріменко С. Г. Вплив гумінових та фульвових кислот на живі організми та перспективи їх застосування в сільському господарстві, медицині та ветеринарії // Агроекологічний журнал. 2023. № 3. С. 143–153. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2023.287774>
17. Трохименко Г., Кібаров О. Роль фульвових та гумінових кислот у процесах біодеградації залишків гербіцидів у ґрунті. В: Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (7 грудня 2023 р., м. Київ). Київ, 2023. С. 57–59. <https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2023.290912>
18. Kravchenko O., Miroshnichenko D., Karnozhytskyi P.P., Homan V., Karnozhytskyi P.V. (2024). Intensifying the process of extraction of humic acids from brown coal by using the hydrocavitation activation methodology. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. Available online 19 September 2024. <https://doi.org/10.1615/InterJEnrCleanEnv.2024053521>
19. Desikan R., Thangavelu K., Uthandi S. Hydrodynamic Cavitation – A Promising Technology for Biomass Pretreatment. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources* 2019, vol. 19, no. 2, 556015. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2019.19.556015>
20. Bis M., Montusiewicz A., Ozonik J., Pasieczna-Patkowska, S. Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of mature landfill leachate. *Ultrasonics Sonochemistry* 2015, vol. 26, pp. 378–387. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.003>
21. Lebiocika M. Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of municipal wastewater. *Journal of Ecological Engineering*. 2020, vol. 21, no. 6, pp. 155–160. <https://doi.org/10.12911/22998993/123163>
22. Кравченко О. В., Суворова І. Г., Гоман В. А., Мусієнко Е. Ю., Даниленко А. М. Комплекс для проведення досліджень процесів виробництва, підготовки і зжигання нових видів композиційних палив // *Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*. 2013. Т. 4, № SI.1. С. 150–160. URL: <https://chiffa.org/JournalEngine/engine/index.php/msj/article/view/323>
23. Han H., Liu A., Wang H. Effect of hydrodynamic cavitation assistance on different stages of coal flotation. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 3, pp. 221. <https://doi.org/10.3390/min10030221>
24. Nedbailo A., Ivanytsky G., Tselen B.Y., Radchenko N., Gozhenko L., Shchepkin V. Application of a pulsating dispersor as a hydrodynamic cavitation reactor for preparation of coal water fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023, vol. 45, no. 1, pp. 28–34. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.4>
25. Kravchenko O., Suworova I., Baranov I., Goman V. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2017, vol. 4(5(88)), pp. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108805>
26. Suworova I., Kravchenko O., Goman V., Baranov I. Criteria for Assessing the Energy-Ecological Effectiveness of using the Sludge of Waste Treatment Plants as Components of Liquid Composite Fuels. *European Journal of Sustainable Development* 2020, vol. 9(4), pp. 328–336. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n4p328>

References (transliterated)

1. Melnikov A., Miroshnichenko D., Karnozhytskyi P.P., Karnozhytskyi P.V. Sorption properties of brown coal processing products. *Chem. Chem. Technol.* 2024, vol. 18, no. 4, pp. 493–501. <https://doi.org/10.23939/chcht18.04.493>
2. Vorres K. S. *Lignite and Brown Coal*. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons Inc, 2010. 29 p. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1209071422151818.a01>
3. Svitlil Yu. G., Krut O. A., Bileckij V. S. Vitchiznyanij dosvid pererobki burogo vugillya na vodovugilne palivo // *Energotehnologii i resursosberezhenie*. 2013. T. 2. № 2. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ETRS_2013_2_3
4. Bileckij V. S. Vugillya bure // *Velika ukrayinska encyklopediya*. URL: https://vue.gov.ua/Vugillya_bure (data zvernennya: 03.03.2025).
5. Belov O., Shustov O., Adamchuk A., Hladun O. Complex Processing of Brown Coal in Ukraine: History, Experience, Practice, Prospects // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 251–268. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.251>
6. Smirnov V. O., Sergiyev P. V., Bileckij V. S. Tehnologiya zbagachennya vugillya: navch. posibnik / Don. nac. tehn. un-t. – Doneck: Shidnij vidavnychij dim, 2011. – 474 s.
7. Sinicina A. O., Karnozhickij P. P. Bure vugillya – sirovina dlya otrimannya vodorozhchinnih sorbentiv // *Integrovani tehnologiyi ta energosberezheniya*. 2023. T. 3. S. 67–77. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.06>
8. Yashuk V. U., Koreckij A. P., Kovbasenko R. V., Dmitriyev O. P., Kovbasenko V. M. Guminovi rehovini – bezpechni regulatori ekosistem. Kyiv: Nacionalna akademiya agrarnih nauk Ukraini, 2016. 89 s.
9. Maffia A., Oliva M., Marra F., Mallamaci C., Nardi S., Muscolo, A. Humic Substances: Bridging Ecology and Agriculture for a Greener Future. *Agronomy* 2025, vol. 15, no. 2, p. 410. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy15020410>
10. Shah M., Rodriguez-Couto S., Kumar V. *New Trends in Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater*. 1st Edition. Netherlands: Elsevier, 2021. 748 p. <http://dx.doi.org/10.1016/C2019-0-04585-2>
11. Lebedev V., Miroshnichenko D., Vytrykush N., Pyshyev S., Masikeyvych A., Filenko O., Tsereniuk O., Lysenko L. Novel biodegradable polymers modified by humic acids. *Mater. Chem. Phys.* 2023, vol. 313, p. 128778. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128778>
12. Miroshnichenko D., Lebedeva K., Cherkashina A., Lebedev V., Tsereniuk O., Krygina N. Study of hybrid modification with humic acids of environmentally safe biodegradable hydrogel films based on hydroxypropyl methylcellulose. *C.* 2022, vol. 8, no. 4, p. 71. doi: 10.3390/c8040071
13. Mahler C. F., Svierzoski N. D. S., Bernardino C. A. *Chemical Characteristics of Humic Substances in Nature*. In Humic Substances. IntechOpen, 2021; pp. 139–153. <https://doi.org/110.5772/intechopen.97414>
14. Tipping E. *Cation binding by humic substances*. Cambridge Environmental Chemistry Series. No. 11. UK: Cambridge University Press, 2004. 434 p.
15. Pleten V. V. Gumati – novij metod u reguluvanni produktivnosti // *Naukovi zapiski CNTU*. 2018. № 23. S. 164–168.
16. Riiskij O. F., Petrusha Yu. Yu., Dombrovskij K. O., Ohrimenko S. G. Vpliv guminovih ta fulvovih kislot na zhivi organizmi ta perspektivi yih zastosuvannya v silskomu gospodarstvi, medicini ta

- veterinariyi // Agroekologichnij zhurnal. 2023. № 3. S. 143–153. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2023.287774>
17. Trohimenko G., Kibarov O. Rol fulvovih ta guminovih kislot u procesah biodegradaciyi zalishkiv gerbicidev u grunti. V: Materiali XXIII Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferenciyi «Ekologiya. Lyudyna. Suspilstvo» (7 grudnya 2023 r., m. Kiyiv). Kiyiv, 2023. S. 57–59. <https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2023.29091218>.
 18. Kravchenko O., Miroshnychenko D., Karnozhytskyi P.P., Homan V., Karnozhytskyi P.V. (2024). Intensifying the process of extraction of humic acids from brown coal by using the hydrocavitation activation methodology. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. Available online 19 September 2024. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2024053521>
 19. Desikan R., Thangavelu K., Uthandi S. Hydrodynamic Cavitation – A Promising Technology for Biomass Pretreatment. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources* 2019, vol. 19, no. 2, 556015. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2019.19.556015>
 20. Bis M., Montusiewicz A., Ozonек J., Pasieczna-Patkowska, S. Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of mature landfill leachate. *Ultrasonics Sonochemistry* 2015, vol. 26, pp. 378–387. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.003>
 21. Lebiocka M. Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of municipal wastewater. *Journal of Ecological Engineering*. 2020, vol. 21, no. 6, pp. 155–160. <https://doi.org/10.12911/22998993/123163>
 22. Kravchenko O. V., Suvorova I. G., Goman V. A., Musienko E. Yu., Danilenko A. M. Kompleks dlya provedeniya issledovaniy processov proizvodstva, podgotovki i szhiganiya novykh vidov kompozicionnykh topliv // *Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*. 2013. T. 4, № SI.1. S. 150–160. URL: <https://chiffa.org/JournalEngine/engine/index.php/msj/article/view/323>
 23. Han H., Liu A., Wang H. Effect of hydrodynamic cavitation assistance on different stages of coal flotation. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 3, pp. 221. <https://doi.org/10.3390/min10030221>
 24. Nedbailo A., Ivanytsky G., Tselen B.Y., Radchenko N., Gozhenko L., Shchepkin V. Application of a pulsating dispersor as a hydrodynamic cavitation reactor for preparation of coal water fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023, vol. 45, no. 1, pp. 28–34. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.4>
 25. Kravchenko O., Suvorova I., Baranov I., Goman V. Hydrocavitational activation in the technologies of production and combustion of composite fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2017, vol. 4(5(88)), pp. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108805>
 26. Suvorova I., Kravchenko O., Goman V., Baranov I. Criteria for Assessing the Energy-Ecological Effectiveness of using the Sludge of Waste Treatment Plants as Components of Liquid Composite Fuels. *European Journal of Sustainable Development* 2020, vol. 9(4), pp. 328–336. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n4p328>

Відомості про авторів / About the Authors

Карножицький Павло Павлович (Karnozhytskyi Pavlo) – аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4740-1971>; e-mail: pavlokarnoenv@gmail.com

Мірошніченко Денис Вікторович (Miroshnichenko Denis) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6335-8742>; e-mail: dvmir79@gmail.com

Карножицький Павло Володимирович (Karnozhytskyi Pavlo) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6019-8432>; e-mail: lab.vtii@gmail.com

Руднева Катерина Євгенівна (Rudneva Kateryna) – старший судовий експерт, Національний науковий центр «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7676-749X>; e-mail: rudneva770@ukr.net