

УДК 622.794

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/30>**Кривда Р.В.**

Дніпровський державний технічний університет

Гаценко К.В.

Дніпровський державний технічний університет

Белянська О.Р.

Кам'янське вище професійне училище

Кравченко О.В.

Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТВОРЕННЯ БРИКЕТІВ ПРИ ДОДАВАННІ У ЯКОСТІ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ КИСЛОЇ СМОЛКИ ТА ФУСІВ

Сучасна українська коксохімічна промисловість потребує модернізації через застарілі технології, що призводять до значних втрат ресурсів та забруднення довкілля. Актуальним напрямком є впровадження ресурсозберігаючих технологій, зокрема використання вугільних брикетів, що сприяє утилізації відходів та підвищенню ефективності виробництва.

Метою даної роботи є дослідження процесу створення вугільних брикетів із застосуванням кислотної смолки та фусів як ефективних в'язучих речовин, а також всебічна оцінка їхніх фізико-механічних характеристик, зокрема міцності на стиснення.

У лабораторних умовах було проведено експериментальне дослідження впливу різних концентрацій кислотної смолки та фусів на формування та міцність вугільних брикетів. Кисла смолка та фуси, будучи побічними продуктами коксування, володіють цінними зв'язувальними властивостями. При нагріванні смола розм'якшується, проникаючи у пори вугілля та утворюючи після затвердіння міцну матрицю, що значно підвищує міцність брикетів. Крім того, фуси, завдяки високому вмісту смолистих речовин, не тільки підсилюють міцність брикетів за рахунок утворення міцних смолистих зв'язків між вугільними частинками, а й впливають на кінетику коксоутворення та мікроструктуру коксу. Передбачається, що їх застосування дозволить знизити питому витрату вугілля на одиницю маси коксу, покращити реакційну здатність коксу та зменшити пилвиділення під час завантаження.

Встановлено, що для формування міцних брикетів оптимальним є тиск не менше 35 МПа. При додаванні 15% кислотної смолки міцність брикетів досягає 53%. При використанні 15% фусів міцність сягає до 60%. Дослідження показали, що низький вміст в'язучого призводить до утворення пористої структури та недостатньої міцності, оскільки не забезпечується повне покриття вугільних частинок. Водночас, оптимальні концентрації в'язучих забезпечують щільну та однорідну структуру брикетів. Результати свідчать про наявність оптимальної концентрації фусів, що забезпечує найкращі властивості брикетів, а надлишок в'язучого може навіть знижувати міцність через надмірну пластичність.

Запропоновані у роботі рішення демонструють високу економічну доцільність та сприяють підвищенню ефективності коксохімічного виробництва, а також раціональному використанню цінних вторинних ресурсів.

Ключові слова: вугілля, брикетування, кисла смолка, фуси.

Постановка проблеми. Українські коксохімічні заводи потребують модернізації через застарілі технології [1], що спричиняють значні втрати ресурсів та забруднення. Перехід на ресурсозберігаючі технології є необхідним кроком для сталого розвитку. Коксування є енергоємним процесом з великими викидами.

Наразі українська коксохімічна промисловість переживає складний період, зумовлений кількома

чинниками: зміною структури споживання енергії (зниження попиту на сталь), значними екологічними проблемами (підприємства є великими забруднювачами), посиленням міжнародної конкуренції та застарілим обладнанням, що потребує модернізації [2, 3].

Створення ресурсозберігаючої технології зменшить ці викиди, знизить споживання ресурсів, покращить екологію та підвищить

конкурентоспроможність. Залучення брикетованого вугілля у технологію отримання доменного коксу є перспективним напрямком, що покращує ефективність та економічність коксування. Використання брикетів із вугілля має ряд переваг, а саме: стабільність якості коксу; зменшення викидів; збільшення продуктивності; зменшення втрат вуглецю; використання дрібних фракцій вугілля; зменшення питомої витрати коксу [1–3].

Брикетування вугільного пилу та дрібних фракцій підвищує якість коксу та знижує питомі витрати сировини. Технологія активно розвивається, зокрема у напрямку створення екологічно чистих зв'язуючих речовин [2, 3]. Це робить брикетування ефективним інструментом для модернізації виробництва вуглецевих матеріалів, підвищення їх конкурентоспроможності та покращення екологічних показників у різних галузях промисловості.

Таким чином, дослідження ресурсозберігаючої технології коксування з вугільними брикетами є актуальним та економічно обґрунтованим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі активно досліджуються оптимальні склади для брикетування бурого та кам'яного вугілля з використанням шламів худого вугілля, а також дешеві та нетоксичні в'язучі речовини, зокрема з відходів коксохімічної промисловості, для підвищення механічної міцності та водостійкості брикетів [4]. Технологічні параметри брикетування без в'язучих (вологість, розмір вугілля, тиск, температура сушіння, тривалість пресування) взаємозалежні, і їх оптимізація критична для досягнення максимальної міцності. Незважаючи на багаторічний досвід, виробництво брикетів в Україні майже зупинилося через дефіцит сировини, відсутність якісних вітчизняних в'язучих та сучасного обладнання. Можливим шляхом стабілізації є виготовлення брикетів з низькосортної вуглецевої сировини з використанням доступних, дешевих та нетоксичних зв'язуючих речовин, що є розумним способом використання, зокрема, бурого вугілля, хоча питання його брикетування та деяких видів кам'яного вугілля ще потребують детального вивчення [4].

Цікавим технологічним прийомом є використання шламу мастильного масла з дротяного заводу, що містить органічні сполуки (переважно жирні кислоти) з хорошими в'язучими властивостями та показниками горіння [5]. У дослідженні [5] з'ясовано, що брикети, виготовлені

з подрібненого вугілля з цим шламом, у якості в'язучої речовини (в'язкість 2,44 Па·с), досягають оптимальної міцності на розрив при тиску формування 12 МПа та вмісті шламу 16%.

Також відомі дослідження щодо використання кам'яновугільного дьогтю та мелясного композитного матеріалу у якості в'язучих речовин для виробництва вугільних брикетів [6]. Вчені [7] досліджують використання біовугільних брикетів з сільськогосподарських відходів – гранатових/оливкових та вугілля для забезпечення стійких енергетичних потреб в умовах дефіциту енергії.

Згідно дослідження [8] брикети, що виготовлені на основі в'язучої речовини – фекального шламу [8], шламу рослинного походження [9] показали перспективні результати щодо зниження викидів у атмосферу, збільшення часу горіння та міцності при стисканні.

У дослідженні [10] для виробництва вугільних брикетів, при використанні у якості в'язучої сировини карбонізованої шкаралупи арахісу, шкаралупи кешью та стебла проса. Було встановлено, що ці брикети мають високий вміст золи (35,68% для арахісу, 17,98% для кешью, 19,29% для проса), нижчі теплові значення (19,49, 26,52 та 22,22 МДж/кг відповідно) та низьку стискаючу міцність (0,34, 0,88 і 1,66 МПа відповідно) [10].

Бездимні паливні брикети з низькосортного вугілля та кісточок оливок (як біомаси), згущені гуматами або мелясою, демонструють перспективні механічні властивості та поведінку при горінні [11].

У роботі [12] досліджено виготовлення вугільних брикетів на основі вугілля і полімерних сполучних. Брикети отримували традиційною технологією: подрібнення, сушіння, змішування, нагрівання, пресування та охолодження. Встановлено, що ПЕТ не руйнує структуру брикету, а після кальцинації основною фазою залишається аморфний вуглець із включеннями оксидів Fe, Si, Ca, польового шпату та Fe_2SiO_4 . У результаті розроблено оптимальні умови формування брикетів.

У дослідженні [13] вивчено брикетування трьох типів вугілля з метою створення бездимних паливних брикетів. Виявлено, що мезопористість вугілля значно впливає на міцність брикетів, спричиняючи їх руйнування при зсувних навантаженнях, незважаючи на подібний елементний склад.

Дослідження [14] описує виробництво некарбонізованих біовугільних брикетів із

суміші низькосортного вугілля (з різним вмістом Сульфуру: 6,57% з Карінгін-Гарут та 0,51% з Баях-Лебак) та ферментованого коров'ячого гною (теплотворна здатність 4192 ккал/кг, 1,56% Сульфуру). Ферментація суміші за допомогою біоактиватора Garant (1:40) + 1% меляси протягом 24 годин дозволила знизити загальний вміст Сульфуру до 1,00–1,14%, що відповідає якісним вимогам. Органічний Сульфур у брикетах знизився на 38–58%.

Дослідження показали, що механічна міцність брикетів залежить від складу суміші, вологості, тиску пресування, режиму теплової обробки та типу сполучної речовини. Зокрема, стискальна міцність зростає у брикетах з дрібним вугіллям (до 1,5 мм) завдяки кращому контакту зі сполучною речовиною [15]. Брикет з модифікованою смолою та бітумом мають на 15–35% вищу міцність, знижений вміст золи (15–18%) та сірки (у 7–15 разів), а також зменшене водопоглинання (на 40–60%). Водночас, брикети з більшими частинками (до 3 мм) утримують менш міцні. Використання вугільного шламу та картонних відходів дозволяє виробляти легкі паливні брикети, що сприяють утилізації відходів та зменшенню шкідливих викидів завдяки отворам для кращого згорання [15].

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження процесу створення вугільних брикетів із застосуванням кислій смолки та фусів як в'язучих речовин, а також оцінка їхніх фізико-механічних характеристик. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання: вивчити вплив додавання кислій смолки та фусів на технологічні параметри процесу брикетування; визначити оптимальні концентрації кислій смолки та фусів, що забезпечують максимальну міцність та стабільність брикетів; дослідити фізико-механічні властивості отриманих брикетів (міцність на стискання).

Виклад основного матеріалу. У лабораторних умовах досліджували брикетування вугілля з додаванням кислій смолки та фусів. Мета – оцінити вплив їх концентрацій на міцність брикетів. Застосування таких брикетів у коксуванні є перспективним для підвищення ефективності та екологічності процесу. Кисла смолка та фуси, як побічні продукти коксування, мають гарні зв'язувальні властивості. Смола розм'якшується при нагріванні, проникає в пори вугілля та після затвердіння утворює міцну матрицю. У процесі пресування вона додатково підвищує міцність

брикетів, а при коксуванні залишає вуглецевий залишок, що підсилює структуру коксу.

До того ж, передбачається, що додавання фусів як в'язучої речовини у вугільні брикети збільшить їх міцність завдяки утворенню смолистих зв'язків між вугільними частинками. Це також дозволить знизити питому витрату вугілля, покращити реакційну здатність коксу та зменшити пиловиділення під час завантаження. Фус, що містить значну кількість смолистих речовин, при нагріванні розм'якшується, склеюючи частинки та впливаючи на кінетику коксоутворення і мікроструктуру коксу.

На рис. 1 представлено вплив тиску на міцність вугільного брикету при вмісті кислій смолки 5% (а) та 10% (б). На рис. 1 показано результати брикетування з додаванням 5% (1) кислій смолки при тиску 26, 31 і 35 МПа. За такої концентрації міцність брикету досягає максимуму 37%. Низький вміст в'язучого не забезпечує повного покриття частинок вугілля, що призводить до утворення пористої структури та недостатньої міцності. На рис. 1 (похила 2) подано дані для 10% смолки при тих самих тисках. У цьому випадку міцність зростає до 48% завдяки більшій кількості зв'язків між вуглецевими частинками. Брикети стають щільнішими, однак все ще залишаються ділянки з неповним зчепленням. За умови додавання 15% кислій смолки та тиску 26–35 МПа міцність брикетів досягає 53%.

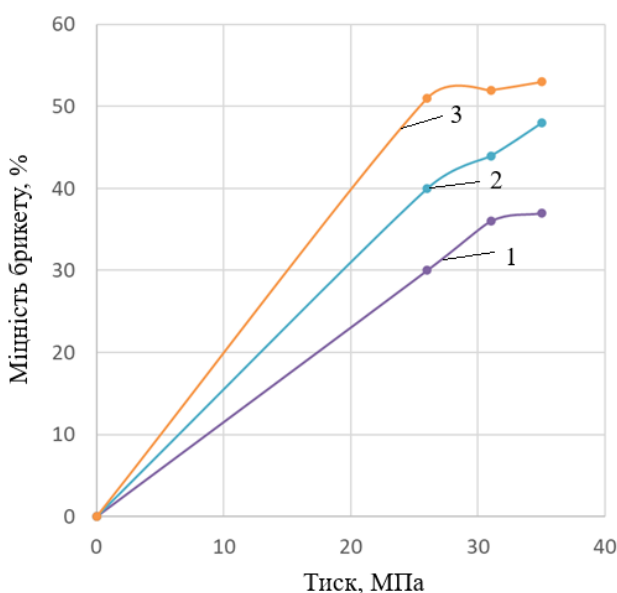


Рис. 1. Вплив тиску на міцність вугільного брикету при вмісті кислій смолки 5–15%
 1 – додавання 5% кислій смолки;
 2 – 10% кислій смолки; 3 – 15% кислій смолки

Така концентрація забезпечує повне покриття частинок вугілля, утворюючи щільну й однорідну структуру. Максимальна міцність спостерігається при тиску 35 МПа.

На рис. 2 наведено залежність міцності вугільних брикетів від тиску при додаванні фусів у концентрації 5–15%. За вмісту 5% міцність досягає лише 32% через недостатню кількість смолистих речовин для ефективного зчеплення частинок. При 10% фусів міцність зростає до 46%, але структура ще залишається неповністю ущільненою. Максимальна міцність (до 60%) спостерігається при додаванні 15% фусів та тиску 35 МПа – частинки вугілля рівномірно покриваються в'язучою речовиною, утворюючи щільну структуру.

Результати свідчать про наявність оптимальної концентрації фусів, що забезпечує найкращі властивості брикетів. Надлишок в'язучого може знижувати міцність через надмірну пластичність і гірше ущільнення. Оптимальні умови: тиск ≥ 35 МПа, 15% фусів – для досягнення високої механічної міцності.

Висновки. Вугільні брикети широко застосовуються завдяки своїм перевагам – високій теплотворній здатності, зручності транспортування та зберігання. Сучасні підходи до технології брикетування орієнтовані на використання відходів, впровадження екологічно безпечних процесів та пошук нових ефективних в'язучих компонентів. У даній роботі розглянуто ресурсозберігаючі вдосконалення технології коксування та наведено їх теоретичне обґрунтування.

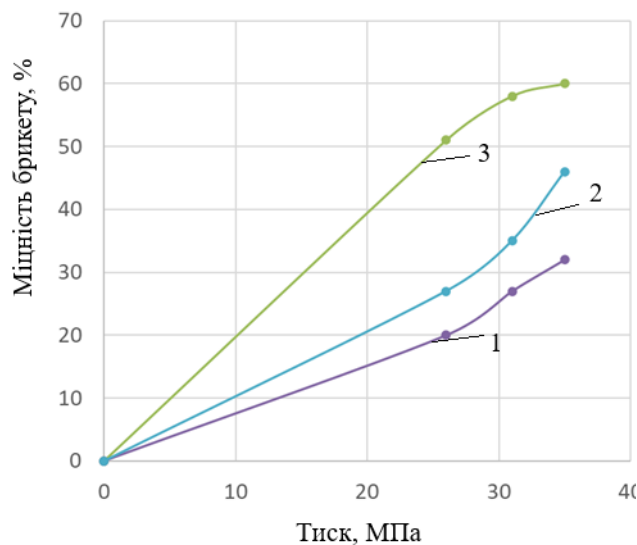


Рис. 2. Вплив додавання концентрації фусів 5–15% на міцність вугільних брикетів
1 – додавання 5% фусів; 2 – додавання 10% фусів;
3 – додавання 15% фусів

Застосування вугільних брикетів у коксуванні дозволяє підвищити ККД, забезпечити стабільність процесу та полегшити експлуатацію коксових печей, що робить запропонований підхід економічно доцільним. Оптимальними умовами формування міцних брикетів є тиск не менше 35 МПа. За такої умови при додаванні 15% кислої смолки досягається міцність до 53%, а при використанні 15% фусів – до 60%. Запропоновані рішення сприяють підвищенню ефективності коксохімічного виробництва та раціональному використанню вторинних ресурсів.

Список літератури:

1. Толстой М. М. Коксохімічна промисловість. *Енциклопедія Сучасної України* / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.]. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2013. URL: <https://esu.com.ua/article-8078> (дата звернення 29.05.2025).
2. Попова О., Попов Є. Методичні основи формування пріоритетів розвитку коксохімічної галузі України з застосуванням когнітивних технологій. *Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*. 2022. № 4. С. 126–131. DOI: <https://surl.li/xyjogq>
3. Венгер В., Шумська С. Металургійна галузь України: динаміка виробництва крізь призму зовнішніх факторів. *Ринок: прогноз і кон'юнктура. Економіка і прогнозування*. 2021. № 1. С. 7–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/eip2021.01.007>.
4. Zasukha I. P. Carbon-bearing Wastes as the Binders for Coal Briquette Production. *Science Research*. 2021. № 9 (1). P. 1–5. DOI: 10.11648/j.sr.20210901.11.
5. Zhang T., Chen X., Zhao X., Gao Y., Song Y. Preparation of briquette coal with a lubricating oil sludge as binder. *Advances in Engineering Research*. Vol. 170. 7th International Conference on Energy and Environmental Protection. Atlantis Press, 2018. P. 1236–1239.
6. Zhong Q., Yang Y., Li Q., Jiang T. Coal tar pitch and molasses blended binder for production of formed coal briquettes from high volatile coal. *Fuel Processing Technology*. 2017. № 157. P. 12–19. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.11.005.
7. Khan A. U., Jan Q. M. U., Abas M., Muhammad K., Ali Q. M., Zimon D. Utilization of Biowaste for Sustainable Production of Coal Briquettes. *Energies*. 2023. № 16. P. 7025. DOI: 10.3390/en16207025.

8. Sanka P. M., Germain O., Khalifa L. Production of low emission briquettes from carbonized faecal sludge as an alternative source of cooking energy. *Energy, Sustainability and Society*. 2024. Vol. 14. DOI: 10.1186/s13705-024-00449-0.
9. Carnaje N. P., Talagon R. B., Peralta J. P., Shah K., Paz-Ferreiro J. Development and characterisation of charcoal briquettes from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)-molasses blend. *PLoS One*. 2018. Vol. 13, № 11. P. e0207135. DOI: 10.1371/journal.pone.0207135.
10. Himbane P. B., Ndiaye L. G., Napoli A., Kobor D. Physicochemical and mechanical properties of biomass coal briquettes produced by artisanal method. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2018. № 12 (12). P. 480–486. DOI: 10.5897/AJEST2018.2568.
11. Blesa M. J., Miranda J. L., Izquierdo M. T., Moliner R. Curing time effect on mechanical strength of smokeless fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*. 2003. № 80(2). P. 155–167. DOI: 10.1016/S0378-3820(02)00243-6.
12. Tulepov M. I., Sassykova L. R., Kerimkulova A. R., Mansurov Z. A. Preparation of Coal Briquettes and Determination of Their Physical and Chemical Properties. *Oriental Journal of Chemistry*. 2019. № 35 (1). P. 180–185. DOI: 10.13005/ojc/350120.
13. Burchill P., Hallam G. D., Lowe A. J., Moon N. Studies of coals and binder systems for smokeless fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*. 1994. № 41 (1). P. 63–77. DOI: 10.1016/S0378-3820(94)90060-4.
14. Mursito A. T., Arifin W. D. N. Characterization of bio-coal briquettes blended from low quality coal and biomass waste treated by Garant bio-activator and its application for fuel combustion. *Sustainable Energy & Fuels*. 2020. № 7. P. 796–806. DOI: 10.1007/s40789-020-00309-0.
15. Tulepov M., Sassykova L., Kerimkulova A. Preparation of coal briquettes based on non-standard kazakhstan coal with various additives and determination of their quality. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2021. № 56 (1). P. 123–132.

Kryvda R.V., Hatsenko K.V., Byelyanska O.R., Kravchenko O.V. RESEARCH ON BRIQUETTE FORMATION USING ACID TAR AND FUS AS BINDERS

The modern Ukrainian coking industry requires modernization due to outdated technologies that lead to significant resource losses and environmental pollution. A relevant direction is the implementation of resource-saving technologies, particularly the use of coal briquettes, which contributes to waste utilization and increased production efficiency.

The purpose of this work is to study the process of creating coal briquettes using acid tar and fusel oils as effective binders, as well as a comprehensive assessment of their physical and mechanical characteristics, including compressive strength.

Experimental studies were conducted in laboratory conditions to investigate the influence of various concentrations of acid tar and fusel oils on the formation and strength of coal briquettes. Acid tar and fusel oils, being by-products of coking, possess valuable binding properties. When heated, the tar softens, penetrates the coal pores, and forms a strong matrix upon solidification, significantly increasing the strength of the briquettes. Furthermore, fusel oils, due to their high content of resinous substances, not only enhance the strength of briquettes by forming strong resinous bonds between coal particles but also affect the kinetics of coke formation and the microstructure of coke. It is expected that their application will allow for a reduction in specific coal consumption per unit mass of coke, improve coke reactivity, and reduce dust emissions during charging.

It has been established that the optimal pressure for forming strong briquettes is no less than 35 MPa. With the addition of 15% acid tar, the briquette strength reaches up to 53%. When using 15% fusel oils, the strength reaches up to 60%. Studies have shown that a low binder content leads to the formation of a porous structure and insufficient strength, as complete coverage of coal particles is not ensured. At the same time, optimal binder concentrations ensure a dense and homogeneous briquette structure. The results indicate the existence of an optimal concentration of fusel oils that provides the best briquette properties, while an excess of binder can even reduce strength due to excessive plasticity.

The solutions proposed in this work demonstrate high economic feasibility and contribute to increasing the efficiency of coke production, as well as the rational use of valuable secondary resources.

Key words: coal, briquetting, acidic tar, fus.