



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: [ete@duet.edu.ua](mailto:ete@duet.edu.ua) Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: C01, C15, C2

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.08

## Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology

Citation:

Shmeltser, K., Kormer, M., & Desna, N. (2025). Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 90–100 <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.08>

Kateryna Shmeltser

*Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*

*e-mail: [shmeltser@duet.edu.ua](mailto:shmeltser@duet.edu.ua)*

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Maryna Kormer

*Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*

*e-mail: [kormer@duet.edu.ua](mailto:kormer@duet.edu.ua)*

 ORCID iD: 0000-0002-6509-0794

Natalia Desna

*Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*

*e-mail: [desna@duet.edu.ua](mailto:desna@duet.edu.ua)*

 ORCID ID: 0000-0003-0768-7813

**Abstract:** The study addresses the problem of the deteriorating quality of the raw material base in the Ukrainian coking industry, which is primarily caused by the increasing proportion of low-caking, high-ash, and high-sulfur coal grades in the charge. This transformation in the composition of the feedstock adversely affects the thermotechnical parameters of the coking process, leading to uneven thermal decomposition of coal components and deteriorating the physico-mechanical properties of the resulting coke, thereby limiting its applicability in blast furnace operations. One of the promising approaches to correcting the technological characteristics of the coal charge is the application of polyvinyl alcohol (PVA) cryogels as a binding and structure-forming component during the partial briquetting of coal. The mechanisms of three-dimensional porous structure formation in PVA cryogels under cyclic freeze-thaw conditions are described, highlighting their water solubility, non-toxicity, excellent film-forming ability, and efficiency in stabilizing dispersed coal particles. Experimental studies are presented to determine the optimal PVA content, freezing regimes, and drying parameters of the briquettes. It has been established that the incorporation of 5–10% PVA ensures the formation of a robust cryogel matrix, which provides the briquettes with enhanced mechanical stability, reduces their brittleness, and prevents structural failure during transportation and charging into coking chambers. The study demonstrates that the use of PVA cryogels compensates for the deficit of high-caking coal grades, improves the homogeneity of the coal charge, intensifies the initial stages of carbonization, and ensures the production of coke with the required operational properties. The obtained results confirm the high efficiency of using PVA as an innovative tool for raw material modification under contemporary industrial and resource constraints, providing a viable strategy to optimize coke quality and overall process performance in modern coking operations.

**Keywords:** coal charge, charge quality, waste/by-products<sup>6</sup> briquetting, cryogels

Received: 12/12/2025

Accepted: 17/12/2025



JEL: JEL: L640, L710

## **Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology**

Kateryna Shmeltser

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: [shmeltser@duet.edu.ua](mailto:shmeltser@duet.edu.ua)

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Maryna Kormer

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: [kormer@duet.edu.ua](mailto:kormer@duet.edu.ua)

 ORCID ID: 0000-0002-6509-0794

Natalia Desna

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: [desna@duet.edu.ua](mailto:desna@duet.edu.ua)

 ORCID ID: 0000-0003-0768-7813

**Abstract:** The study addresses the problem of the deteriorating quality of the raw material base in the Ukrainian coking industry, which is primarily caused by the increasing proportion of low-caking, high-ash, and high-sulfur coal grades in the charge. This transformation in the composition of the feedstock adversely affects the thermotechnical parameters of the coking process, leading to uneven thermal decomposition of coal components and deteriorating the physico-mechanical properties of the resulting coke, thereby limiting its applicability in blast furnace operations. One of the promising approaches to correcting the technological characteristics of the coal charge is the application of polyvinyl alcohol (PVA) cryogels as a binding and structure-forming component during the partial briquetting of coal. The mechanisms of three-dimensional porous structure formation in PVA cryogels under cyclic freeze-thaw conditions are described, highlighting their water solubility, non-toxicity, excellent film-forming ability, and efficiency in stabilizing dispersed coal particles. Experimental studies are presented to determine the optimal PVA content, freezing regimes, and drying parameters of the briquettes. It has been established that the incorporation of 5–10% PVA ensures the formation of a robust cryogel matrix, which provides the briquettes with enhanced mechanical stability, reduces their brittleness, and prevents structural failure during transportation and charging into coking chambers. The study demonstrates that the use of PVA cryogels compensates for the deficit of high-caking coal grades, improves the homogeneity of the coal charge, intensifies the initial stages of carbonization, and ensures the production of coke with the required operational properties. The obtained results confirm the high efficiency of using PVA as an innovative tool for raw material modification under contemporary industrial and resource constraints, providing a viable strategy to optimize coke quality and overall process performance in modern coking operations.

**Keywords:** coal charge; charge quality; waste/by-products; briquetting; cryogels

## **Перспективи застосування багатоатомних спиртів як ефективних екологічних зв'язуючих у технології підготовки вугільної шихти для коксування**

Катерина Шмельцер

Доцент, кандидат технічних наук, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: [shmeltser@duet.edu.ua](mailto:shmeltser@duet.edu.ua)

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Марина Кормер

Доцент, кандидат хімічних наук, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: kormer@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-6509-0794

Наталія Десна

Доцент, кандидат технічних наук, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: desna@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-0768-7813

**Анотація:** Розглядається проблема погіршення якості сировинної бази коксохімічної промисловості України, що зумовлено зростанням частки слабоспівного, високосольного та високосірчастого вугілля у шихті. Така трансформація структури сировини негативно впливає на теплотехнічні показники процесу коксування, викликає нерівномірність термораспаду компонентів та погіршує фізико-механічні властивості одержуваного коксу, обмежуючи можливість його використання у доменному виробництві. Одним із перспективних шляхів корекції технологічних характеристик шихти запропоновано застосування кріогелів полівінілового спирту (ПВС) як зв'язувального та структуроутворювального компонента під час часткового брикетування вугілля. Описано механізми формування тривимірної пористої структури кріогелів ПВС у процесі циклічного заморожування-розморожування, їх водорозчинність, нетоксичність, високу плівкоутворювальну здатність та ефективність у стабілізації дисперсних частинок вугільної фракції. Наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення оптимального вмісту ПВС, температурних режимів заморожування та параметрів сушіння брикетів. Встановлено, що введення 5–10 % ПВС забезпечує формування міцної кріогелевої матриці, яка надає брикетам підвищену механічну стійкість, знижує їх крихкість та запобігає руйнуванню на етапах транспортування і завантаження у камери коксування. Показано, що застосування кріогелів ПВС сприяє компенсації дефіциту добреспівного вугілля, покращує однорідність шихти, інтенсифікує початкові стадії карбонізації та забезпечує отримання коксу з необхідними експлуатаційними характеристиками. Отримані результати підтверджують високу ефективність використання ПВС як інноваційного засобу модифікації сировини в умовах сучасних виробничих та ресурсних обмежень.

**Ключові слова:** вугільна шихта; якість шихти; відходи; брикетування; кріогелі

## Вступ (Introduction)

На сучасному етапі розвитку металургійної галузі у світовій практиці відсутні технології виробництва металу, які могли б повністю замінити доменний процес. Кокс залишається незамінним шихтовим компонентом, що виконує одночасно роль відновлювального агенту, палива та структуроутворювача шихти.

Попри значний рівень технічного розвитку доменного виробництва, його потенціал удосконалення ще не вичерпано. Подальші напрями модернізації визначаються насамперед сировинною базою, енергетичною ситуацією та економічними чинниками.

Особливу роль у стабільності доменного процесу відіграє паливна складова, важливість якої не викликає сумнівів серед фахівців. У зв'язку з цим якість коксу, як основного паливного й відновлювального матеріалу, набуває ключового значення. Підвищення його якості є одним із головних завдань сучасного коксохімічного виробництва, від якого безпосередньо залежить ефективність і економічність виплавки чавуну.

Прогрес у розвитку світового коксодоменного виробництва забезпечив значне підвищення якості коксу (*Farias Neto et al., 2021, Soloviov et al., 2024*), що дозволяє стабільно

використовувати пиловугільне паливо у кількості понад 200 кг на тонну чавуну без погіршення технологічних показників доменного процесу. На жаль, вітчизняна промисловість, унаслідок об'єктивних економічних та сировинних обмежень, поки що не досягла рівня найкращих світових стандартів якості коксу.

До основних вимог, що висуваються до кам'яновугільного коксу, належать висока газопроникність насипної маси, зумовлена його механічною міцністю при високих температурах, а також оптимальна щільність, яка визначає стійкість до стирання та руйнування (Miroshnichenko et al., 2023).

Однак сучасна вугільна сировинна база характеризується погіршенням марочного складу, нестабільністю фізико-хімічних властивостей і нерівномірністю постачання, що ускладнює завдання стабільного виробництва коксу необхідної якості.

Водночас вітчизняна наука та виробництво мають значний досвід і напрацювання у сфері створення високоефективних технологій коксування, спрямованих на підвищення якості готового продукту.

Особливе значення у процесі отримання кам'яновугільного коксу належить підготовці вугілля та вугільних сумішей до коксування. Одним із найперспективніших напрямів підвищення якості коксу та зниження його питомих витрат у доменному виробництві є удосконалення технології підготовки шихти, зокрема шляхом застосування спеціальних методів термічної та нетермічної обробки вугілля перед коксуванням.

В останні роки українські коксохімічні підприємства зіткнулися з гострим дефіцитом вугілля, придатного для коксування. Одночасно спостерігається тенденція до зростання цін на імпортне вугілля, що ускладнює забезпечення стабільної сировинної бази для галузі.

Паралельно відбувається збільшення видобутку слабоспівливого та сірчистого вугілля, що істотно обмежує можливості формування якісних шихт для шарового коксування. За сучасних умов для цих цілей можна використовувати лише близько 40 % вугілля, яке видобувається в Україні.

Марочний склад вугільної сировини характеризується наступним співвідношенням: газове (Г) – 56 %, довгополум'яне газове (ДГ) – 10 %, жирне (Ж) – 12,5 %, коксове (К) – 7 %, піснеспівливе (ПС) – 10 %, пісне (П) – 2 %. Таким чином, частка газового вугілля є надмірно високою, тоді як запаси цінних марок – коксового, жирного та піснувато співливого – у межах Донецького басейну становлять не більше ніж 0,33 % і продовжують скорочуватися.

За таких умов отримання коксу виключно зі співливого вугілля є неможливим, а подальше використання наявних запасів призведе до їх швидкого виснаження. Це зумовлює необхідність пошуку нових технологічних підходів до формування вугільної шихти та вдосконалення процесу коксування (табл. 1).

**Таблиця 1.** Склад шихти для шарового коксування КХП України по роках

| Марка вугілля,<br>% | 1970 р. | 1980 р | 2010 р | 2020 р. |
|---------------------|---------|--------|--------|---------|
| Г                   | 32,4    | 39,4   | 16,1   | 14,2    |
| Ж                   | 33,0    | 27,7   | 40,9   | 20,5    |
| К                   | 14,5    | 17,4   | 31,5   | 19,4    |
| ПС                  | 19,5    | 13,1   | -      | 29,1    |
| П                   | 0,6     | 2,4    | -      |         |
| Інші марки          | -       | -      | 11,5   | 16,8    |

Зі зростанням частки газового вугілля у шихті виникає потреба у збільшенні вмісту коксового та жирного вугілля, які забезпечують необхідну співливість суміші. Вугілля марки Ж, що видобувається у Донецькому басейні, характеризується високою співливістю ( $y = 26\text{--}31$  мм), завдяки чому його можна змішувати з суттєвою кількістю неспівливого вугілля без значного погіршення якості коксу.

Однією з актуальних проблем залишається підвищений вміст сірки у вугільних пластах.

Сірчисте вугілля негативно впливає на процес термічної переробки вугільної шихти, знижує її коксівну здатність і створює як технологічні, так і екологічні труднощі під час коксування.

У зв'язку з цим на коксохімічних підприємствах України все ширше застосовується вугілля з низьким вмістом сірки, що імпортується з різних країн. За останні роки масова частка імпортного вугілля у шихті зросла з 11 % до 70 %.

У сучасних умовах використання лише коксового вугілля для коксування є неможливим через обмеженість його запасів та низький рівень видобутку. Тому у виробництві коксу застосовують вугільні шихти — суміші вугілля різних марок, підібрані у таких співвідношеннях, які забезпечують отримання продукту з необхідними фізико-хімічними властивостями та технологічними характеристиками.

Відповідно до вимог, прийнятих у європейській практиці, якість доменного коксу повинна відповідати певним показникам (табл. 2).

**Таблиця 2.** Основні показники якості доменного коксу за європейськими стандартами

| № | Показник якості                              | Поз.            | Норм. зн. | Характеристика показника                                                                 |
|---|----------------------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Механічна міцність, %                        | M <sub>25</sub> | ≥ 88–90   | Визначає стійкість коксу до руйнування при транспортуванні та завантаженні в доменну піч |
| 2 | Стиранність (при – 10 мм), %                 | M <sub>10</sub> | ≤ 6–8     | Характеризує ступінь утворення дріб'язку під час механічного навантаження                |
| 3 | Реакційна здатність коксу, %                 | CRI             | 20–28     | Показує здатність коксу реагувати з CO <sub>2</sub> при 1100 °C                          |
| 4 | Міцність після реакції з CO <sub>2</sub> , % | CSR             | ≥ 60–70   | Визначає залишкову міцність коксу після реакції з вуглекислим газом                      |
| 5 | Вміст золи, %                                | A <sup>d</sup>  | ≤ 11–12   | Впливає на вихід шлаку та витрату флюсів у доменному процесі                             |
| 6 | Вміст сірки, %                               | S <sup>d</sup>  | ≤ 0,6     | Визначає якість чавуну та шлаку, впливає на екологічні показники                         |
| 7 | Вологість, %                                 | W <sup>r</sup>  | ≤ 4       | Впливає на теплотворну здатність і стабільність горіння                                  |
| 8 | Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>         | ρ <sub>n</sub>  | 420–480   | Характеризує газопроникність коксового шару в доменній печі                              |

Світова практика експлуатації доменних печей із використанням коксу, що відповідає зазначеним вимогам, підтвердила, що такий кокс забезпечує достатню газопроникність як у шахті, так і у високотемпературній зоні печі. Вважається, що показник реакційної здатності (CRI) має бути якомога нижчим, оскільки це зменшує витрати вуглецю коксу на газифікацію за реакцією Будуара.

Особливу увагу приділяють вмісту у коксі шкідливих домішок – золи, сірки, лужних сполук і фосфору, які негативно впливають на хід доменного процесу, властивості чавуну та шлаку. Вологість коксу також регламентується й не повинна перевищувати 5 %, що вважається прийнятним рівнем для мінімізації негативного впливу води на стабільність плавки.

Досягнення такого рівня якості коксу можливе лише за умови раціонального вибору сировинної та технологічної бази на всіх стадіях виробництва: від формування оптимального марочного складу вугільної шихти та технології її підготовки – до встановлення і суворого дотримання оптимальних параметрів процесу коксування.

У світовій практиці постійно ведуться дослідження, спрямовані на вдосконалення, підвищення ефективності та адаптацію технологій коксування до змін ринкової кон'юнктури, коливань цін на вугілля, кокс і залізорудну сировину.

Водночас в Україні спостерігається тенденційне погіршення сировинної бази коксування, зокрема щодо марочного складу вугілля. Починаючи з 1960-х років, забезпечення необхідної міцності коксу у межах традиційного шарового коксування стало проблематичним.

Вимушене збільшення частки вугілля марок Г, ДГ, ПС, П у шихті в межах наявних технологічних схем, як правило, призводить до системного зниження якості коксу – насамперед його механічної міцності та технологічних характеристик. Розв'язання цієї проблеми здійснювалося шляхом розроблення високопродуктивних процесів, що забезпечують отримання коксу високої якості з вугільних шихт зі зниженою спіклівістю.

Згідно з дослідженнями, проведеними в ДП «УХІН», оптимальна шихта для коксування повинна містити не менше 69 % спікливого вугілля марок Ж, К та ПС, тоді як частка газового вугілля має становити менше 31 % (*Butuzova, et al., 2015*).

Одним із перспективних напрямів підвищення якості кам'яновугільного коксу та зниження його питомих витрат у доменному виробництві є спеціальна підготовка вугілля та його сумішей до коксування. Цю підготовку можна здійснювати термічними або нетермічними методами.

Нетермічні методи підготовки мають враховувати особливості розвитку сировинної бази коксування, необхідність її диференціації, технічний стан пічного фонду, а також вимоги доменного виробництва до якості коксу. Їх застосування спрямоване на вирішення двох ключових завдань:

- одержання кондиційного коксу в умовах поступового погіршення якості вугільної сировини та змін марочного складу шихт;
- створення ефективних технологічних прийомів впливу на шихту з метою покращення якості кінцевого продукту.

Одним із найефективніших нетермічних способів підвищення коксівності шихт із підвищеним (понад 50–60 %) вмістом слабоспікливого вугілля є часткове брикетування із застосуванням зв'язувальних речовин (*Adeleke et al., 2022*).

Роль зв'язуючих речовин у процесі коксування частково брикетованих шихт. Коксохімічна промисловість має великий досвід у застосуванні органічних добавок до шихт для коксування. Для цих цілей використовують різноманітні речовини, отримані в процесах нафтової та коксохімічної промисловості: мазут, гас, бітуми, залишки високотемпературних процесів, кам'яновугільну смолу, пек, а також відходи виробництва.

Широкий асортимент органічних добавок має різні агрегатні стани — тверді, пластичні та рідинні. Це, у свою чергу, визначає особливості технології приготування брикетів.

Найбільш часто для зв'язування використовують нафтові продукти (важкий залишок від переробки смолистих нафт), кам'яновугільну смолу, кам'яновугільний пек, сланцеві бітуми, смоли напівкоксування та фуси напівкоксування. Брикети, виготовлені на основі кам'яновугільного пеку, відрізняються підвищеною термостійкістю.

Зв'язуючі речовини повинні мати не лише в'язучі, але й спікаючі властивості, забезпечуючи при цьому: високий вихід і високу якість брикетів, стабільну роботу брикетних агрегатів та допоміжного обладнання, отримання міцного коксу, а також відсутність небажаних побічних ефектів. Важливими вимогами також є доступність, екологічність і економічність застосовуваних матеріалів.

Механізм дії органічних добавок, за даними УХІНу, полягає у зсуві реакцій термодеструкції в бік відновлювальних процесів. Це веде до збільшення утворення рідинних нелетких продуктів деструкції, що підтверджується зниженням вмісту водню та метану в газах, що утворюються при температурах до 500°C.

Як наслідок, спостерігається зменшення уявної в'язкості пластичної маси, збільшення товщини пластичного шару і розширення температурного діапазону пластичного стану вугілля.

Таким чином, застосування органічних добавок є одним із перспективних напрямків для покращення якості коксу та розширення вугільної сировинної бази.

## Матеріали та методи (Materials and Methods)

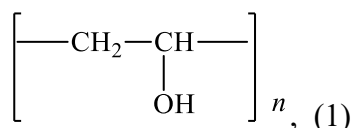
Об'єктом дослідження була вугільна шихта, яку обробляли кріогелем на основі полівінілового спирту. Кріогелі, наповнені частинками вугільної шихти або сажі ( $d \approx 0\text{--}3$  мм), одержували введенням дрібнодисперсного вугілля у водний розчин полівінілового спирту (ПВС) у кількості 25–60 мас.%. Подальше проведення циклу заморожування–відтавання забезпечувало формування структурованих кріогелів із рівномірним розподілом наповнювача в полімерній матриці.

Встановлено, що оптимальний вміст дрібнодисперсного вугілля у складі брикету становить не більше 60 %. Збільшення його частки понад зазначене значення спричиняє неповне просочування частинок розчином полівінілового спирту (ПВС) та утворення міжчастинкових пустот. У результаті після сушіння спостерігалось зниження міцності зразків і їх часткове руйнування [Ауааet al., 2025].

Імовірно, зниження міцності брикетів за підвищеного вмісту дрібнодисперсного вугілля пов'язане з обмеженим змочуванням поверхні частинок полімерним розчином та зниженням ефективності міжчастинкової адгезії. Надлишок твердого компонента призводить до формування пористої структури з недостатньою кількістю зв'язувальної фази, що негативно впливає на однорідність та механічну стабільність сформованого матеріалу. Для запобігання цьому доцільно регулювати співвідношення вугілля та ПВС з урахуванням дисперсності наповнювача та в'язкості розчину зв'язувальної речовини.

## Результати (Results)

**Властивості полівінілового спирту (ПВС) і кріогелів на його основі.** У даній роботі як зв'язувальну речовину для виготовлення вугільних брикетів запропоновано використовувати кріогелі полівінілового спирту (ПВС). Полівініловий спирт є штучним карболанцоговим регулярним лінійним полімером, який являє собою полі-1-гідроксіетилєн загальної формули:



Фізико-хімічні властивості ПВС значною мірою залежать від способу його одержання - зокрема, від умов полімеризації полівінілацетату та ступеня його омилення. Залежно від молекулярної маси (від 10000 до 1000000) та вмісту залишкових ацетатних груп, що залишаються після гідролізу полівінілацетату, отримують кілька марок ПВС, які відрізняються за розчинністю у воді та в'язкістю.

За кімнатної температури близько 70 % гідроксильних груп полімеру перебувають у зв'язаному стані. Практично повне руйнування водневих зв'язків спостерігається при температурі близько 150 °С. Завдяки наявності великої кількості гідроксильних груп ПВС розчиняється лише в гарячій воді (80–100 °С) при інтенсивному перемішуванні протягом 2–4 годин.

Полівініловий спирт є твердим полімером білого кольору, без запаху і смаку, нетоксичним. При термообробці в інтервалі температур 80–225 °С він здатний до кристалізації, досягаючи ступеня кристалічності до 68 %. Макромолекули ПВС містять близько 1,0–2,5 % ланок, присднаних за типом «голова до голови», і мають атактичну будову. Механічні властивості полімеру визначаються міжмолекулярною взаємодією гідроксильних груп і залежать від орієнтації макромолекул (Bala-Litwiniak et al., 2019).

На сучасному етапі промисловий синтез полівінілового спирту здійснюється гідролізом полівінілацетату. ПВС є одним із найпоширеніших синтетичних водорозчинних полімерів, що



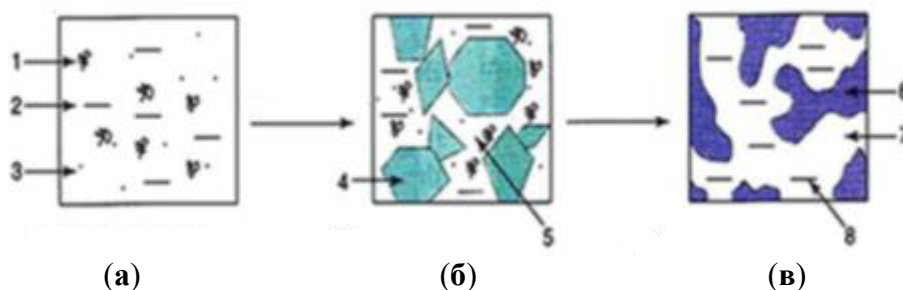
завдяки своїм фізико-хімічним властивостям широко застосовується як зв'язувальна речовина в різних технологічних процесах, зокрема у виробництві вугільних брикетів.

Широке застосування полівінілового спирту (ПВС) зумовлене поєднанням його цінних властивостей: нетоксичністю, розчинністю у воді, стійкістю до дії органічних розчинників, високою міцністю та здатністю до утворення міцних плівок (*Yankovych et al., 2025*).

Водні розчини ПВС після заморожування при від'ємних температурах (нижче 0 °С) і подальшого відтавання формують пружні полімерні матеріали - криогелі (*Rajput et al., 2022*).

Процес кріотропного гелеутворення є багатостадійним. На початковому етапі полімер розчиняють у розчиннику, найчастіше у воді або диметилсульфоксиді. Після одержання однорідного розчину систему частково заморожують і витримують протягом певного часу при заданій негативній температурі. Кристалізація основної маси розчинника є необхідною умовою для формування гетерогенної структури гелю.

У замороженому стані система набуває двофазної структури: одна фаза складається з полікристалів замерзлого розчинника, інша - з тонких прошарків незамерзлої рідини, у яких концентруються гелеутворюючі компоненти. Під час розморожування ці ділянки утворюють пористу полімерну матрицю, пори якої заповнюються розтопленим розчинником і набувають округлої форми завдяки силам поверхневого натягу (*Hasan et al., 2025, Stauffer et al., 1992*).



**Рисунок 1. Схема процесу кріотропного гелеутворення**

а) вихідна система; б) заморожена система; в) система після відтавання

1 – високомолекулярна гелеутворююча вихідна речовина; 2 – розчинник; 3 – низькомолекулярний гелеутворюючий вихідна речовина; 4 – полікристали замерзлого розчинника; 5 – незамерзла рідка мікрофаза; 6 – полімерна сітка криогеля; 7 – макропори; 8 – розчинник, що розтанув

У випадку нековалентних (фізичних) криогелів процес гелеутворення відбувається під час розморожування заморожених препаратів. Умови кожної стадії, а також властивості конкретних попередників, значно впливають на ефективність утворення кріотропного гелю, що, у свою чергу, визначає властивості та структуру отриманих криогелевих матеріалів.

Фізико-хімічні та реологічні характеристики, а також макро- і мікроструктура криогелів можуть бути регульовані в широкому діапазоні шляхом варіювання таких параметрів, як режим кріогенної обробки (температура та тривалість заморожування, швидкість відтавання, кількість циклів заморожування-розморожування тощо), а також характеристика полімеру, (молекулярна маса, молекулярно-масовий розподіл, вміст залишкових ацетатних груп, тактовність і концентрація) (*Botha et al., 2021*).

Перша гіпотеза щодо механізму гелеутворення полімерних розчинів полягає у механічній деструкції полімерних ланцюгів під впливом динамічної напруги, що виникає при кристалізації низькомолекулярного розчинника. З сучасної точки зору, в розчині ПВС при заморожуванні розвиваються процеси, що сприяють утворенню макрорадикалів полімеру.

Температура плавлення утворених криогелів перевищує 70 °С. Механічні властивості кріоструктуратів істотно відрізняються від властивостей вихідних в'язкотекучих композицій,



що дозволяє використовувати пружні кріогелі як зв'язуючий матеріал. Вони є перспективним матеріалом для брикетування дрібнодисперсних частинок.

Введення модифікаторів і наповнювачів у вихідну полімерну композицію (водний розчин ПВС) може значно покращити фізико-механічні та споживчі властивості кінцевого продукту.

Для брикетування можна використовувати ПВС з молекулярною масою від 50 000 до 150 000. Встановлено, що для утворення кріогелів необхідна мінімальна концентрація полімеру в розчині не менше 5 %. Ці дані свідчать про те, що у таких розчинах вже існує суцільна флуктуаційна сітка з переплутаних макромолекулярних ланцюгів, наявність якої підтверджується проявом ефекту Вайссенберга, характерного для неньютонівських рідин [Beavers et al., 1977]. Ефект Вайссенберга полягає в тому, що неньютонівська рідина (розчин полімерів) піднімається і «намотується» на обертовий стрижень замість того, щоб відкидатися назовні. Це відбувається через те, що полімерні ланцюжки закручуються навколо стрижня, створюючи натяг, який змушує рідину підніматися. Це є наслідком нормального напруження, яке діє як кільцеве навколо стрижня.

Для отримання кріогелів водні розчини ПВС різних концентрацій заливають у циліндричні комірки та заморожують при температурі мінус 20 °С протягом 24 годин, після чого їх розморожують за кімнатною температурою. Утворюються еластичні каучукоподібні кріогелі) (Henning et al., 2017).

При вмісті полімеру нижче 5 % з нього після циклу заморожування-відтавання кріогелі не утворюються. З практичної точки зору, для отримання кріогелів доцільно використовувати мінімальну концентрацію полівінілового спирту, тому для отримання брикетів доцільно використовувати 5-10 мас.% водний розчин ПВС (Korol et al., 2025).

Технологічна схема отримання брикетів була розроблена на основі (Jindaporn et al., 2015): порошок ПВС розчиняли у воді, далі змішували цей розчин з просоченими маслом частинок вугільної шихти та завантажували в ємності певної форми і об'єму. Далі цю суміш вібраційне ущільнювали та заморожували протягом доби. Після розморожування брикетів у природних умовах їх сушили.

При термообробці брикетів варіювалося 2 фактори – температура та тривалість процесу. У ряді досліджуваних режимів проводилося підсушування отриманих брикетів при температурі 80-90 °С. Міцність брикетів оцінювалася методом роздавлювання із контролем максимального зусилля, яке витримує брикет. Визначення характеристик міцності проводилося після остигання брикетів до кімнатної температури.

Кокс має капілярно-пористу структуру, тому для запобігання абсорбції води його частинками їх попередньо просочували поглинальним кам'яновугільним маслом, а потім змішували з водним розчином ПВС.

Оптимальний вміст дрібного вугілля у брикету не більш 60 %, при його збільшенні спостерігається недостатнє просочування частинок розчином ПВС і утворення пустот між ними, тому такі брикети після сушіння розсипалися. Склад та фізичні властивості брикетів представлені у табл. 3.

**Таблиця 3.** Склад брикетів на основі полівінілового спирту

| № | Склад брикетів, % |         |      |       | Міцність, МПа | Калорійність, МДж/кг |
|---|-------------------|---------|------|-------|---------------|----------------------|
|   | ПВС               | Вугілля | Вода | Масло |               |                      |
| 1 | 15,5              | 49,5    | 35   | -     | 29,5          | 30,6                 |
| 2 | 10,5              | 39,5    | 50   | -     | 29,9          | 31,8                 |
| 3 | 25,5              | 49,5    | 45   | -     | 27,3          | 30,1                 |
| 4 | 20,5              | 59,5    | 9,5  | 9,5   | 32,4          | 29,5                 |
| 5 | 30,5              | 49,5    | 9,5  | 9,5   | 33,8          | 35,2                 |

Технологічна схема отримання брикетів була розроблена на основі (Jindaporn et al., 2015): порошок ПВС розчиняли у воді, далі змішували цей розчин з просоченими маслом

частинками вугільної шихти та завантажували в ємності певної форми і об'єму. Далі цю суміш вібраційно ущільнювали та заморожували протягом доби. Після розморожування брикетів у природних умовах їх сушили.

## **Висновки (Conclusions)**

Розуміння основних принципів брикетування дозволяє ефективно вирішувати завдання щодо розширення застосування цієї технології та оптимізації використання її продуктів. Це дає можливість правильно визначити пріоритети та адаптувати методи виробництва брикетів відповідно до вимог сучасної промисловості, що є важливим для досягнення довгострокових цілей розвитку глобальної економіки.

Брикетування дрібного вугілля з використанням зв'язуючого є перспективним напрямом, що потребує подальшого розвитку, особливо у створенні нових технологій брикетування комбінованих сумішей енергетичних палив і коксівного вугілля. Це дозволяє ефективно використовувати різні види вугілля в коксовому виробництві.

Пелетизація кам'яного вугілля перед коксуванням відкриває нові можливості для застосування неспікальних сортів вугілля, що значно знижує витрати на коксове виробництво та підвищує його ефективність.

Брикетування дозволяє забезпечити максимальний контакт частинок вугілля та їх ущільнення, що збільшує одноразове завантаження коксових пічних камер, підвищує продуктивність процесу коксування та покращує механічні властивості коксу.

Моделювання процесів брикетування на основі відходів полідисперсних коксових частинок та криогелів полівінілацетату, а також експериментальні дослідження дозволили розробити методику створення міцних брикетів з дрібного коксу та вугільних відходів, а також утилізації інших компонентів з відновлювальними властивостями.

Запропоноване технічне рішення, яке передбачає використання відходів виробництва коксу, не тільки дозволяє знижувати витрати, але й має позитивний вплив на екологічну безпеку, зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

## **Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

## **Фінансування (Funding)**

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

## **Внесок авторів (Authors contribution)**

Концептуалізація, К. М.; методика, Ш. К.; формальний аналіз, Д. Н.; аналітичні дані, К. М.; візуалізація, Ш. К.; нагляд, К. М.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

## **Література (References)**

- Adeleke, A.A., Odusote, J.K., Ikubanni, P.P., Adebisi, J.A. & Adesina, O.S. (2022). Briquetting of Subbituminous Coal and Torrefied Biomass Using Bentonite as Inorganic Binder. *Sci. Rep.* 12, 8716. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12685-5>
- Ауаа, Ф., Ойедотун, К., & Лубвама, М. *et al.* (2025). Production and Characterization of Densified Briquettes From Nanocomposite Biochar-Cellulose Nanocrystal (Biochar-CNC) Reinforced with Polyvinyl Alcohol (PVA). *Waste Biomass Valor.* 16, 2075–2095. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03005-9>

- Bala-Litwiniak, A., & Radomiak, H.(2019). Possibility of the Utilization of Waste Glycerol as an Addition to Wood Pellets. *Waste Biomass Valor.* 10, 2193–2199 . <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0260-7>
- Botha, D.L., Leokaoke, N.T., Bunt, J.R., & Neomagus, H. (2021). Evaluation of polymer binders in briquetting of coal fines for combustion applications. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 3, 113–118. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/991/2021>
- Butuzova, L. F., Makovskii, R. V., Kleshnya, G. G. & Milov, D. Yu. (2015). Koksuvannya vugilnikh sumishei z velikim vmistom slabospiklivogo ta sirchistogo vugillya. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii.* 73, 1/5, 61-66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37022>
- Farias Neto. G.W., Leite, M.B.M. & Marcelino, L.O.(2021). Optimizing the coke oven process by adjusting the temperature of the combustion chambers. *Energy*, 15, 119419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119419>
- Hasan, H.A., Saharuddin, S.N.D.M. & Muhamad, M.H.(2025). Unlocking the Potential of Polyvinyl Alcohol (PVA) as a Biocarrier for Enhanced Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *J. Water Process Eng.*, 74, 107780. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107780>
- Henning, C.N., Leokaoke, N.T., Bunt J.R. & Waanders, F.B. (2017). Testing of Briquettes Made from Witbank Coal Fines with Polyvinyl Alcohol as Binder. *Fuel Processing Technology.* 159, 88-95. <https://eares.org/siteadmin/upload/4301EAP1118226.pdf>
- Jindaporn J., & Chaloenporn L. (2015). Properties of Densified-Refuse Derived Fuel Using Glycerin as a Binder. *Procedia Engineering* 100, 505. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.397>
- Korol N., & Yankovych V. (2025). Polyvinyl Alcohol-Based Binder Systems for Biomass and Charcoal Briquettes. *Fuels*, 6, 81. <https://doi.org/10.3390/fuels6040081>
- Miroshnichenko, D.; Shmeltser, K.; Kormer, M. (2023). Factors affecting the formation the carbon structure of coke and the method of stabilizing its physical and medical properties. *C-J. Carbon Res*, 9, 66. <https://doi.org/10.3390/c9030066>
- Rajput, S. P., & Thorat B. N. (2022). Recovered polyvinyl alcohol as an alternative binder for the production of metallurgical quality coke breeze briquettes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42, 3, 475-485. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1619558>
- Silva Viana, R., André May, A., & Almeida Moreira, *et al.* B.R.(2023). Addition of Glycerol to Agroindustrial Residues of Bioethanol for Fuel-Flexible Agropellets: Fundamental Fuel Properties, Combustion, and Potential Slagging and Fouling from Residual Ash. *Industrial Crops and Products.* 192, 116134. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116134>
- Soloviov, Ye. O., Miroshnychenko, D. V., Zelenskyi O. I., Pyshiev, & S. V. (2024). Suchasni tekhnologii pererobky palnykh kopalyn : tezy dop. 7-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 17-18 kvitnia 2024 r. / Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t", Ukr. derzh. n.-d. vuhlekhim. in-t (UKhIN). Kharkiv: NTU "KhPI", 28-33. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79044>
- Yankovych, V. & Korol, N. (2025). Mechanochemical and Molecular Analysis of Organic Binders in Charcoal Briquetting for Enhanced Cold Mechanical Strength. *Cleaner Engineering and Technology*, 29. 101113. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101113>