

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кравченка Сергія Олександровича

### **«НАУКОВІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА ДОМЕННОГО КОКСУ З ТРАМБОВАНИХ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.07 – хімічна технологія палива і паливно-мастильних матеріалів

#### **Загальна характеристика роботи**

Робота Кравченка С.О. присвячена розв'язанню складного і комплексного науково-технічного завдання – формуванню наукових основ ефективного виробництва доменного коксу із застосуванням технології трамбування вугільних шихт. Проблематика дослідження знаходиться на перетині таких важливих напрямів, як хімічна технологія палива, тепломасообмінні процеси, механіка сипких тіл і газодинаміка.

Автор демонструє глибоке володіння матеріалом, сучасними експериментальними методиками, знання промислових процесів та здатність до комплексного системного аналізу. Поставлені у роботі завдання чітко сформульовані, логічно пов'язані між собою та підкріплені результатами глибоких досліджень і промислових впроваджень.

#### **Актуальність теми**

Актуальність дослідження не викликає сумніву. З огляду на сучасні виклики коксохімічної промисловості України, пов'язані з необхідністю енергозбереження, зниженням якості сировини, необхідністю підвищення міцності коксу та адаптації виробництва до більш гнучких шихт, впровадження технології трамбування є критично необхідним.

Робота також є актуальною з позиції екологічної безпеки: зменшення витрат на теплоносії, покращення якості коксу та зниження викидів у процесі гасіння є прямими наслідками впровадження запропонованих автором технічних і технологічних рішень.

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача, щодо полягає у створенні наукових основ виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт.

*Об'єкт дослідження* – процеси підготовки вугільної шихти для трамбування та гасіння отриманого коксу.

*Предмет дослідження* – визначення технологічних параметрів підготовки вугільної шихти для трамбування, а також післяпичної обробки доменного коксу.

Тема пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт кафедри «Технології переробки нафти, газу та твердого палива» Національного технічного університету «ХПІ» та у ДЕРЖАВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ «ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ ПО ПРОЕКТУВАННЮ ПІДПРИЄМСТВ КОКСОХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ (ДП «ГИПРОКОКС», м. Харків). Здобувач, перебуваючи керівником наукової школи «Розробки і проектування коксових технологій та їх впровадження» ДП «ГИПРОКОКС», як виконавець брав безпосередню участь у науково-дослідній роботі «Нові технічні рішення з конструкції і технології сухого гасіння коксу на основі технічних рішень характерних сучасним УСКВ великої потужності» (ДР№0123U100729, замовник - ДП «ГИПРОКОКС»)..

**Наукова новизна та значення результатів** полягає в тому, що на підставі теоретичних та експериментальних досліджень здобувачем розроблено наукові основи виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт, а саме:

– вперше встановлено експериментальним шляхом вплив фізико-хімічних (стадія метаморфізму та петрографічна однорідність), а також фізико-механічних (гранулометричний склад, вологість, тиск розпирання) показників якості вугілля та вугільних шихт на їх трамбованість. Мінімальні значення трамбованості вугільних шихт досягаються при конкретних параметрах якості вугілля ( $R_0 = 1,17\%$ ;  $V^{daf} = 25,7\%$ ;  $Y = 14,3\text{ мм}$ ;  $HGI = 69,6\text{ од.}$ ;  $RI = 37,9\text{ од.}$ ;  $a = 1,9\%$ ;  $FSI = 2,6\text{ од.}$ ), що відповідають вугіллю марки «К» згідно ДСТУ 3472:2015. Це дає можливість отримувати високоякісний кокс, замінюючи в шихті для трамбування вугілля марки «К» сумішшю вугілля інших марок з необхідним комплексом властивостей. Максимальні значення трамбованості вугільних шихт, які характеризуються  $V^{daf} = 27,6-29,3\%$  досягається при вологості  $W_i = 11,5-12,1\%$  та

вмісту класів <0,5 мм (58 %) і <3,15 мм (93,8 %), що дозволяє розробити конкретні рекомендації щодо його коригування;

– вперше на сучасному лабораторному обладнанні досліджено, що показник трамбованості вугільних шихт суттєво впливає на механічну міцність отриманого доменного коксу. Експериментально показано, що підвищення трамбованості вугільної шихти з 11,6 до 14,3 кПа призводить до поліпшення якості одержаного доменного коксу за показником  $M_{25}$  з 88,0 до 90,2 %, та за показником  $M_{10}$  з 6,9 до 6,0 %. Це дозволяє впливати на механічну міцність доменного коксу шляхом змінення технологічних або сировинних умов його виробництва;

– вперше запропоновано механізм термохімічних реакцій при коксуванні вугілля з підвищеною насипною щільністю. Збільшення щільності сприяє інтенсифікації теплопередачі, дифузії проміжних продуктів і взаємодії радикалів, що змінює швидкість і глибину низько-, середньо- та високотемпературних реакцій. Регулювання тиску на поверхні вугільних зерен підвищує концентрацію низькомолекулярних продуктів деструкції, сприяючи утворенню додаткових рідких пластифікаторів, які покращують пластичність вугілля та якість коксу, підвищує вихід газоподібних і рідких продуктів на початкових стадіях та твердих залишків на фінальній. Запропонований механізм відкриває можливості для оптимізації коксування та покращення характеристик кінцевих продуктів;

– вперше на унікальному лабораторному обладнанні встановлений вплив поверхні та продуктивності конвеєрів, вологості вугільних шихт, їх гранулометричного складу на процеси їх залипання. Показано, що зменшення вмісту води у вугільній шихті з 12 до 10 %, вмісту в ній частинок розміром 0–3 мм з 94 до 90 %, використання «чорної» замість «хромованої» поверхні, а також зменшення продуктивності роботи конвеєрів (з 350 до 250 т/год) призводить до підвищення швидкості її руху без виникнення залипання. Отримані результати використовуються для проектування та обслуговування конвеєрів для транспортування вугільних шихт для трамбування;

– вперше отримані дані щодо розподілу частинок коксу, дуття, тиску та температури в установці сухого гасіння коксу. Встановлено, що при

послідовному відкритті затворів коксовозного вагона досягається рівномірний розподіл дрібних фракцій коксу (22-29 %) у порівнянні з одночасним відкриттям, де цей показник коливається від 8-10 до 38-44 %. Це дозволяє зменшити витрати теплоносія з 1,5 до 1,3 м<sup>3</sup>/кг коксу. Використання конусних розсікачів сприяє формуванню практично плоских горизонтальних ділянок у форкамері, що запобігає сегрегаційним процесам. При діаметрі конусного розсікача 80 мм утворюється горизонтальна ділянка діаметром 170-180 мм з перепадом між пристінковими та верхніми рівнями завантаження від 10 до 20 мм. Це свідчить про значне покращення рівномірності розподілу фракційного складу коксу. Дослідження також показали, що гідравлічний опір у секторах під час одночасного відкриття затворів може перевищувати 20 % у секторі з переважним накопиченням дрібних класів коксу, що призводить до необхідності збільшення витрат теплоносія вище нормованих значень. Впровадження оптимізованих технологій може призвести до зниження питомих витрат теплоносія та покращення техніко-економічних показників роботи УСГК, що є важливим для підвищення ефективності виробництва.

– вперше змодельовані принципи розподілу порозності коксу і газових потоків в зоні гасіння в залежності від застосування різних дугтьових пристроїв на комп'ютерній моделі УСГК. Втрати напору крізь шар коксу залежать від гранулометричного складу і варіюються від 6,6 Па для частинок >80 мм до 520,0 Па для частинок <25 мм, а порізність коксового шару становить від 0,627 до 0,633 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Розроблений завантажувальний пристрій забезпечує рівномірність розподілу грубого класу коксу (>60 мм) на рівні 42 % і зменшує нерівномірність дрібного класу (<60 мм) до 22 %, а використання розподільника з круглим випускним отвором діаметром 1,6 м знижує нерівномірність розподілу дрібних частинок до 16,8 %. Час випорожнення виври збільшився з 12,8 до 13,5 с зі зниженням середньої витрати з 744,6 до 592,6 кг/с, а кут розльоту частинок стабілізувався на рівні 16° через 0,75 с. Швидкість сходу коксу в зонах прискореного руху перевищує середню в 3,4 рази, а використання схрещених балок дозволяє зменшити загальну швидкість сходу на 30 %. За наявності периферійного дуття максимальна температура газу становить 750 °С, а виток

дугтя збільшується з 6,0 до 7,7%. Впровадження результатів досліджень сприятимуть підвищенню рівномірності газопроникності та ущільнення коксу, забезпечено контрольований і рівномірний потік під час завантаження, покращено розподіл частинок у камері та ефективність охолодження коксу, що сприяє оптимізації конструкцій завантажувальних пристроїв і режимів роботи зон гасіння.

**Практична цінність** отриманих результатів для металургійної промисловості України полягає у тому, що:

– вперше обґрунтована міцність трамбованої шихти для камер коксування різної висоти з метою зниження кількості локальних обвалів. Для коксових камер заввишки 5,5 м значення трамбованості ( $\sigma_{zz}$ ) повинно складати не менше 12 кПа; 6,25 м – не менше 14 кПа; 7,3 м – не менше 16 кПа. Зазначене обґрунтування необхідно використовувати для підбору сировинної бази коксування для проєктування нових коксових батарей з технологією трамбування;

– розроблена технологічна схема підсушки вугільної шихти із використанням барабанних сушарок при застосуванні тепла відпрацьованої водяної пари після турбогенераторів УСГК. Для визначення обладнання робочої лінії розраховано матеріальний і тепловий баланси;

– вперше на підставі отриманих експериментальних даних у лабораторній моделі УСГК для поліпшення рівномірності розподілу коксу і газового потоку рекомендовано: 1) використання конусних розсікачів у завантажувальних лійках для забезпечення рівномірного розподілу частинок коксу; 2) регулювання послідовності відкривання затворів коксовозного вагона для зменшення сегрегації частинок за фракційним складом; 3) оптимізація конструкції дугтьової головки, зокрема впровадження конфузорно-дифузорних лійок, для поліпшення розподілу теплоносія за рахунок вирівнювання потоків у різних секторах камери гасіння;

– вперше на підставі отриманих результатів комп'ютерного моделювання рекомендовано: 1) для зменшення сегрегації фракцій коксу застосовувати розсікачі діаметром 800 мм і більше; 2) для забезпечення рівномірного розподілу газових потоків як по горизонталі, так і по вертикалі, що підвищує ефективність

охолодження коксу, використовувати двоярусні дугтьові пристрої великого діаметра; 3) для покращення подачі газу в центральну частину камери, де найчастіше спостерігаються зони зі зниженим газопроникненням через високу порозність, використовувати склянкоподібні дугтьові пристрої; 4) знижувати висоту падіння коксу шляхом регулювання конструкції завантажувальних лійок або використання багаторівневих завантажувальних пристроїв; 5) спрямувати периферійне дугтя на зони з підвищеною порозністю для покращення охолодження цих ділянок; 6) забезпечити збалансоване співвідношення потоків між центральною частиною і периферією камери для покращення охолодження коксу. Оптимальним є співвідношення 40/60 % між потоками через щілину і дистриб'ютор;

– розраховано, що впровадження технології коксування трамбованої шихти на діючих коксових батареях дозволить знизити вартість вугільної шихти на 32,5 \$/т. Термін окупності капітальних вкладень при будівництві комплексу об'єктів сухого гасіння коксу становить 3 роки, а річна рентабельність 32,8 %;

– технічна новизна розробок, щодо вдосконалення установки сухого гасіння коксу, захищена 3 патентами України. Теоретичні та практичні результати, які отримані під час виконання досліджень, впроваджені у навчальний процес в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний університет», Державному підприємстві «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут «УХІН» (м. Харків) та Державному підприємстві «Державний інститут по проектуванню підприємств коксохімічної промисловості «ДП «ГИПРОКОКС» (м. Харків), що підтверджено актами впровадження.

#### **Повнота викладення результатів в опублікованих працях.**

За темою дисертації опубліковано 34 наукові праці: 23 статті, з них 17 – у наукових фахових виданнях України, 6 статей – у наукових періодичних фахових виданнях з наукометричних баз Scopus та Web of Science; 8 – у матеріалах апробаційного характеру, отримано 3 патента України на винахід.

Усі публікації містять результати роботи автора на окремих етапах виконання дисертаційної роботи та відображають основні її положення і висновки.

Участь здобувача у роботах, що опубліковано у співавторстві, зазначена у дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають Порядку присудження ступеня доктора технічних наук.

### **Оцінка вмісту дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 основних розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 372 сторінки: 19 рисунків за текстом; 35 таблиць за текстом, 218 найменувань використаних джерел на 26 сторінках; 5 додатків на 49 сторінках.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність досліджуваної проблеми, висвітлено її зв'язок з існуючими науковими програмами, державними та галузевими планами й тематиками, а також чітко сформульовано мету дослідження, основні завдання та напрямки її досягнення. У цьому ж розділі визначено наукову новизну отриманих результатів, їх прикладне значення для виробництва, окреслено особистий внесок здобувача в проведенні дослідження, а також наведено інформацію про апробацію основних положень дисертації на конференціях, наукових семінарах і в опублікованих працях.

*Розділ 1* присвячено системному аналізу сучасного стану технологій виробництва доменного коксу та можливих напрямів їх подальшого вдосконалення. Особливу увагу приділено світовим тенденціям розвитку коксохімічної промисловості, зокрема аналізу обсягів виробництва металургійного коксу. Встановлено, що динаміка розвитку коксохімічної галузі визначається сукупністю економічних чинників, серед яких ключову роль відіграє кон'юнктура ринку: обсяги виробництва металургійного коксу безпосередньо залежать від потреб доменного виробництва, яке, своєю чергою, визначається попитом сталеплавильного комплексу на передільний чавун. Незважаючи на поширення альтернативних способів виробництва сталі, доменна виплавка чавуну, яка базується на використанні вуглецевих відновників,

залишається домінуючим методом отримання первинного металу і в найближчій перспективі не втрачатиме актуальності.

У другому розділі охарактеризовано об'єкти дослідження та методи, застосовані для аналізу властивостей вугілля та вугільних шихт. Визначення фізико-хімічних характеристик вугільної сировини здійснювалося відповідно до чинних державних стандартів України (ДСТУ) та міжнародних нормативів ISO із використанням комплексного підходу. Зокрема, проведено ситовий аналіз, технічний ( $W^r_t, W^a, A^d, S^d_t, V^{daf}$ ), пластометричний ( $x, y$ ), петрографічний ( $R_0, Vt, Sv, I, L$ , рефлектограма вітриніту) і елементний ( $C^{daf}, H^{daf}, N^{daf}, S^d_t, O^{daf}$ ). Додатково оцінювалися показники розмолоздатності за методом Хардгрова ( $HGI$ ), індекс спікливої здатності за Рогу ( $RI$ ), індекс вільного спучування ( $FSI$ ), ділатометричні показники за методом Одібера-Арну ( $t_1, t_{II}, t_{III}, a, b$ ) та пластичні властивості за методом Гізелера ( $F_{max}, t_1, t_{max}, t_3, \Delta t$ ).

Розділ 3 присвячено формуванню складів вугільних шихт для процесу трамбування. У ході дослідження проведено всебічну оцінку трамбованості 13 вугільних концентратів різного ступеня метаморфізму з метою визначення їх придатності до використання у технології виробництва трамбованого коксу. Встановлено, що оптимальні параметри шихти відповідають характеристикам коксівного вугілля. Зокрема, виявлено, що оптимальна вологість трамбованої шихти становить 11,5–12,1 %, змінюючись у залежності від вмісту летких речовин. Аналіз розпирання шихт показав, що на величину тиску розпирання найбільший вплив справляє частка дрібних частинок ( $<0,5$  мм), при цьому оптимальними умовами  $V^{daf} = 28,4$  %,  $R_0 = 1,08$  %,  $<0,5$  мм = 52,6 %. Розроблено концептуальну модель термохімічних перетворень під час коксування трамбованої шихти, яка пояснює покращення пластичності вугілля та формування якісних структурно-механічних характеристик коксу. Експериментальні дослідження підтвердили, що кокси, отримані з високо ущільнених шихт, мають покращені механічні показники. Встановлено, що оптимальна висота кокових камер для таких шихт складає 5,5 м. Водночас, збільшення вологості та частки дрібнозернистих компонентів у шихті негативно впливає на швидкість переміщення матеріалу по конструкційних листах. У

зв'язку з цим було запропоновано технологічну схему підсушування шихти, яка включає використання барабанних сушарок та вторинного тепла відпрацьованої водяної пари, що дозволяє покращити підготовку вугілля до процесу трамбування.

У четвертому розділі подано результати експериментальних досліджень газодинамічних процесів у лабораторній моделі установки сухого гасіння коксу (УСГК). Проаналізовано вплив різних умов завантаження коксу на вертикальний розподіл частинок різних фракцій у камері гасіння. Розглянуто також вплив висоти зони гасіння та конструктивних особливостей дуттьової головки на траєкторії руху частинок у повітряному потоці. Досліджено вплив сегрегації коксового матеріалу та зміни порозності засипу на просторовий розподіл повітряного дуття у камері гасіння. Встановлено залежності між конструкцією дуттьових пристроїв та ефективністю гасіння, що є підґрунтям для подальшої оптимізації конструкції камер.

У п'ятому розділі наведено результати чисельного моделювання газодинамічних процесів у різних зонах УСГК. Проведено комп'ютерне моделювання етапів завантаження коксу у коксовізний вагон, розвантаження у камеру-накопичувач, спуску коксу в камеру гасіння, а також побудовано гідравлічну модель камери з урахуванням теплообміну. Отримані результати дозволяють краще зрозуміти особливості руху коксу й поведінки газового потоку, що, своєю чергою, є основою для оптимізації параметрів гасіння з метою підвищення ефективності процесу та якості кінцевого продукту.

Дисертація має логічну й чітку структуру, яка охоплює всі етапи дослідження – від постановки задачі до впровадження результатів. Матеріал викладено грамотно, науково й послідовно. Оформлення, стилістика, мова – відповідають вимогам до докторських дисертацій. Робота супроводжується великим обсягом якісних ілюстрацій, таблиць і графіків.

#### **Академічна доброчесність.**

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлено основні наукові результати роботи, не виявлено.

Усі результати, що виносяться автором на захист, отримано самостійно та відображено в опублікованих роботах. У роботах, що опубліковано у співавторстві, Кравченку Сергію Олександровичу належать тільки ті ідеї, положення та розрахунки, що отримано їм самостійно.

#### **Зауваження та побажання**

1. Недостатньо враховано роль шкідливих домішок у вугіллі (*Cl*, *Zn*, *Na*). Вплив таких елементів на хімічні реакції та структуру коксу міг би бути більш детально проаналізований, особливо в умовах використання альтернативної сировини.

2. Опис моделювання газодинаміки потребує графічного підкріплення. В роботі наявна інформація про моделювання, але відсутні графічні карти розподілу температур чи тисків по камері гасіння.

3. Відсутній окремий розділ або параграф з екологічною оцінкою запропонованої технології. Було б доцільно порівняти показники екологічної безпеки запропонованого процесу з традиційними схемами виробництва коксу.

4. У частині висновків спостерігається певне дублювання фрагментів основного тексту. Рекомендується подавати висновки більш аналітично, з формуванням інтегральної оцінки отриманих результатів.

5. Не в усіх таблицях наведено статистичні параметри точності (похибки, відхилення). Це важливо для оцінки достовірності й порівнюваності результатів.

6. Питання залипання шихти на конвеєрах розглянуто переважно з механічної позиції. Водночас було б доцільно оцінити зміну адгезійних властивостей шихти при зміні вологості або температури – з термодинамічної точки зору.

7. Аналіз патентної новизни у світовому масштабі не проведено. Робота містить дані про патенти України, але не порівнює рішення з аналогами у міжнародних базах (наприклад, WIPO, Espacenet), що зменшує переконливість унікальності деяких рішень.

8. Вплив геометрії камер коксування на тепломасообмін описано переважно емпірично. Було б корисно надати більш теоретичне обґрунтування закономірностей, наприклад, через критерії подібності ( $Re$ ,  $Nu$ ).

9. Суттєвість впливу тиску на термохімічні процеси розглянута лише у контексті трамбованості. Варто було б розширити це питання і розглянути тиск як чинник зміни рівноваги реакцій коксування.

10. Автор майже не звертається до сучасної англомовної літератури останніх 3–5 років. Це дещо звужує огляд та обґрунтування новизни в глобальному науковому контексті.

#### **Загальні зауваження.**

11. Робота має бути написана від першої особи однини. В роботі багато разів зустрічається вислови «ми зробили...», «... на нашу думку ...» тощо.

12. На рисунках до Розділу 3, що відображають різноманітні залежності, не вказано напрям вісей, розмірності величин вказані не за стандартом. На деяких рисунках, наприклад, 3.1 – 3.7 експериментальні точки з'єднані функціональною залежністю без обґрунтування виду залежності.

13. Мають місце граматичні помилки та неточності.

#### **Висновок**

Дисертаційна робота Кравченка Сергія Олександровича «НАУКОВІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА ДОМЕННОГО КОКСУ З ТРАМБОВАНИХ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.17.07 – Хімічна технологія палива і паливно-мастильних матеріалів.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливу науково-прикладну проблему, а саме створено науково-технологічні основи виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт. Незважаючи на вказані зауваження, які мають характер конструктивних рекомендацій і не знижують наукової цінності дослідження, слід визнати, що дисертаційна робота Кравченка Сергія Олександровича «НАУКОВІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА ДОМЕННОГО КОКСУ З ТРАМБОВАНИХ ВУГІЛЬНИХ

ШИХТ» є високопрофесійною, самостійною науковою працею, що вносить вагомий вклад у розвиток хімічної технології палива. Робота повністю відповідає вимогам, встановленим до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор - **КРАВЧЕНКО Сергій Олександрович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.07 – Хімічна технологія палива і паливно-мастильних матеріалів.

Офіційний опонент

Проректор з наукової роботи

Східноукраїнського національного

університету імені Володимира Дашкевича

доктор техн. наук, професор

Олексій ЦЕЛІЩЕВ

19.06.2025

