

Рецензія

на дисертаційну роботу **Мукіної Наталі Володимирівни «Оптимізація виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161-Хімічні технології та інженерія

1. Актуальність теми

Кокс у доменному процесі виконує наступні функції: енергетичну (забезпечує процес теплом), хімічну (джерело відновних газів і вуглецю для відновлення чавуну) і фізичну (підтримку колони шихтових матеріалів, забезпечення потоку газу крізь піч і потік рідкого металу в нижні частини печі). Динамічний технологічний розвиток сталеливарної промисловості, який спостерігався в останнє десятиліття, в тому числі щодо роботи доменних печей із зростаючим об'ємом і використання замісних видів палива (пиловугільне паливо, рідке паливо та природний газ), призвело до зростання важливості фізичної ролі коксу і, як наслідок, підвищення вимог до його параметрів міцності. Саме тому ключову роль на даний час відводять параметрам якості коксу, оціненим за методом NSC (Nippon Steel Corporation), тобто CRI (coke reactivity index) і CSR (coke strength after reaction). Параметри якості коксу формуються рядом факторів, серед яких, насамперед, якість вугільної сировини (включаючи ступінь метаморфізму, хімічний склад, властивості коксування, реологічні, петрологічні та мінералогічні характеристики) та параметри приготування вугільної суміші для коксування (наприклад, насипна щільність, гранулометричний склад та вологість).

Якість коксу також залежить від умов процесу коксування (тривалість коксування і кінцева температура процесу) і застосовуваних методів вторинної переробки коксу. Зазначені фактори впливають на розвиток текстури та структури коксу, що значною мірою визначає його технологічні властивості. Досягнення виробниками необхідних показників якості коксу вимагають використання в коксівній суміші великої кількості коксівного вугілля найвищої якості (коксівного), що значно збільшує собівартість продукції на одиницю продукції. Приблизно 75 % цих витрат становить вартість приготування вугільної суміші. Загалом на світовому ринку спостерігається дефіцит коксівного вугілля найкращої якості, а його пропозиція характеризується великими коливаннями параметрів якості. Коксівне вугілля більш ніж на 50% дорожче слабкоспікливого. Така залежність склалася історично, і прогнози на найближчі роки також вказують на зростання цін на коксівне вугілля. Враховуючи, що коксохімічні заводи, залежно від виробничої потужності, щорічно переробляють від кількох сотень тисяч до кількох десятків мільйонів тон вугілля, економія за рахунок цього може суттєво вплинути на економічний баланс. Тому з точки зору економіки виробництва коксу вигідно виробляти високоякісний кокс із коксової шихти з максимально можливим вмістом більш дешевого вугілля.

Враховуючи зазначене вище, є доцільним виконання досліджень щодо оптимізації виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування, у зв'язку з тим, що ця технологія дозволяє використовувати велику кількість дешевого газового вугілля без зниження якості отриманого доменного коксу.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в рамках наступних науково-дослідних робіт:

- «Оптимізація складів вугільних шихт, умов їх підготовки та коксування для отримання коксу заданої якості за показниками *CRI* та *CSR* на коксових батареях №1–4 і 5–6 КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» (ДР№ 0121U112668, замовник – ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»);
- «Підбір оптимальних параметрів підготовки та коксування трамбованих вугільних шихт з метою зниження об'ємів коксового газу на обігрів коксових батарей № 5, 6 КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» з метою отримання коксу необхідної якості (ДР№ 0120U102813, замовник – ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»).

3. Аналіз змісту дисертації. Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Дисертаційна робота спрямована на розвиток наукових основ і уявлень щодо оптимізації виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування.

Об'єкт дослідження – оптимізація процесу підготовки та коксування трамбованих вугільних шихт.

Предмет дослідження – вугільні концентрати, трамбовані вугільні шихти.

Мета – на підставі виконання теоретичних та експериментальних досліджень вирішити важливе науково-практичне завдання, яке характеризується науковою новизною і має практичне значення, а саме – оптимізацію виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт, що характеризуються різним вмістом газового вугілля.

В експериментальній частині роботі використані сучасні стандартизовані методи визначення властивостей вугілля – ситовий, технічний (W_{rt} , W_a , A_d , S_{dt} , V_{daf}), пластометричний (x , y), петрографічний (R_o , V_t , S_v , I , L , рефлектограма вітриніту) і елементний (C_{daf} , H_{daf} , N_{daf} , S_{dt} , O_{dafd}) аналізи. Для визначення показника окиснення вугілля і шихт використовували ДСТУ 7611:2014 «Вугілля кам'яне. Метод визначення окиснення і ступеня окиснення». Тиск розпирання вугілля та вугільних шихт визначали згідно ДСТУ 8724:2017 Вугілля кам'яне та шихти на його основі. Метод визначення тиску розпирання, який виникає під час з коксування». Міцність трамбованого вугілля і вугільних шихт визначали на лабораторному обладнанні у ДП «УХІН» (м. Харків).

Статистичний аналіз отриманих результатів і розробка математичних залежностей виконувалася за допомогою ліцензійної комп'ютерної програми Microsoft Excel.

У вступі обґрунтована актуальність задач дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульована мета та основні задачі, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, відзначена апробація результатів роботи.

В першому розділі здійснений аналітичний огляд вітчизняних та світових джерел інформації, щодо використання технології трамбування при виробництві доменного коксу.

Встановлено, що технологія трамбування вугільних сумішей для виробництва доменного коксу широко використовується у світі для використання низькометаморфізованого вугілля.

Вугільна сировинна база коксохімвиробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» останні п'ять років носить стійкий міжбасейновий характер з переважанням в ній імпортного вугілля. Протягом 2017–2021 років склад і показники якості вугільної шихти для виробництва коксу на к.б. № 1–4 практично не зазнали змін, в той час як у вугільній шихті для виробництва коксу на к.б. № 5, 6 відбувається зниження частки високолеткого вугілля з одночасним збільшенням вмісту середньоюлетких і низьколетких компонентів. Використання технології трамбування дозволяє отримувати доменний кокс більш високої якості. Зокрема, кокс, отриманий на к.б. № 5, 6 характеризується більш низькими значеннями зольності, вмісту загальної сірки та стирання (M_{10}), при одночасно більш високих значеннях механічної міцності за показником подрібнюваності (M_{25}) і післяреакційної міцності (CSR).

Таким чином, доцільним є обґрунтування використання різної кількості малометаморфізованого (насамперед, газового вугілля) в вугільних шихтах для коксування, визначити вплив технологічних факторів на показники трамбування та якість доменного коксу, а також хімічних продуктів коксування.

У другому розділі охарактеризовано необхідний і достатній набір інструментальних, переважно, стандартизованих методів дослідження складу і властивостей вугілля та вугільних шихт.

Встановлені основні методи оцінки властивостей вугілля та вугільних шихт, використані в дисертаційній роботі, зокрема, визначення показника міцності трамбованого вугілля і вугільних шихт.

Визначені основні методи оцінки властивостей трамбованого вугілля, а також визначення виходу коксу та основних хімічних продуктів коксування з трамбованих вугільних шихт.

У третьому розділі наведені результати дослідження щодо оптимізації підготовки вугільної шихти до коксування в умовах комплексу коксових батарей №5, 6 КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». Зокрема, наведені результати оцінки міцності трамбованого індивідуального вугілля та трамбованого вугілля в бінарних сумішах, які можуть використовуватися для

оптимізації технології підготовки трамбованої вугільної шихти до коксування.

Встановлено, що міцність трамбованого пирога (σ_{zz}) з подрібненого індивідуального вугілля, що входить в сировинну базу КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ», тісно пов'язана з вмістом класів <3 і <0,5 мм. Збільшення вмісту класів <3 і <0,5 мм призводить до зростання міцності трамбованого пирога. Використовуючи отримані математичні залежності можна оптимізувати міцність трамбованого пирога вугільних шихт за допомогою зміни вмісту класів <3 і <0,5 мм.

Визначено, що фактичні значення σ_{zz} для бінарних вугільних сумішей є вище розрахованих. Зі збільшенням рівня помелу вугільних шихт з 90,1 до 92,2 % відбувається зростання величини показника σ_{zz} з 12,5 до 15,0 кПа, тобто на 10 %. Тобто, змінюючи ступінь подрібнення вугільної шихти можна оптимізувати міцність її трамбованого пирога.

При збільшенні вологості шихти з 10,0 до 11,5 % міцність трамбованого пирога зростає. Збільшення вмісту води вище 12 % небажано через зниження міцності трамбованого вугільного пирога, а також збільшення витрат тепла на коксування, яке йде на випаровування води. Тобто, змінюючи вміст води у вугільній шихті, можна оптимізувати міцність її трамбованого пирога.

У четвертому розділі в лабораторних умовах досліджували вплив вмісту газового вугілля у трамбованих вугільних шихтах на якість отриманого з них доменного коксу. Оптимізація вмісту газового вугілля в вугільних шихтах дозволить виробляти доменний кокс необхідної якості. Збільшення спікливості і коксівності вугільної шихти з вмістом газового вугілля ≤ 40 % призводить до поліпшення показників механічної міцності доменного коксу.

Встановлено лінійну залежність між показниками *CRI* та *CSR* дослідного коксу, отриманого з вугільних шихт з вмістом газового вугілля 40 %.

Максимальний вплив на показники механічної міцності коксу, отриманого з вугільних шихт, що характеризуються підвищеним (більше 40 %) вмістом газового вугілля, мають показники ступеня метаморфізму (V_{daf} , R_0) та тиску розпирання (P_{10}).

Встановлено можливість прогнозування показників механічної (I_{25} , I_{10}) та післяреакційної міцності (*CSR*), а також реакційної здатності (*CRI*) коксу, отриманого з вугільних шихт, що характеризуються підвищеним (більше 40 %) вмістом вугілля газової групи. За допомогою розроблених математичних залежностей зв'язується можливість оптимізувати якість виробляемого доменного коксу в умовах ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ».

У п'ятому розділі експериментально досліджували вплив технології трамбування вугільних шихт на вихід з них хімічних продуктів коксування.

Враховуючи можливе окиснення вугільної сировини, а також неможливість прогнозувати вихід аміаку та сірководню за величиною виходу

летких речовин, розроблено математичні залежності, що описують вихід усіх основних хімічних продуктів коксування за даними елементного складу вихідних трамбованих вугільних шихт.

З підвищенням вмісту газового вугілля (виходу летких речовин) у трамбованих вугільних шихтах знижується вихід коксу, а також підвищується вихід смоли, бензолу, вуглекислого газу, пірогенетичної вологи та коксового газу.

Вихід основних хімічних продуктів коксування підпорядковується правилу адитивності і може бути розрахований загалом для підприємства з урахуванням показників якості та відсоткової участі насипних та трамбованих вугільних шихт.

На підставі отриманих математичних залежностей можливо оптимізувати вихід хімічних продуктів коксування з вугільних шихт, за допомогою зміни їх марочного та компонентного складів. *Висновки* сформульовано чітко, вони повністю висвітлюють отримані результати та відповідають поставленим завданням дослідження. За своїм рівнем висновки повністю відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список використаних джерел достатньо повно охоплює предметну галузь та відображає опрацювання автором значної кількості сучасних вітчизняних та закордонних джерел.

Додатки до роботи містять матеріали досліджень, що не увійшли в основну частину.

4. Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна полягає у можливості оптимізації технології трамбування вугільних шихт з точки зору досягнення необхідних показників міцності трамбованого пирога та якості отриманого доменного коксу.

1. Встановлено, що міцність трамбованого пирога (σ_{33}) з подрібненого індивідуального вугілля, що входить в сировинну базу КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», тісно пов'язана з вмістом класів <3 і $<0,5$ мм. Збільшення вмісту класів <3 і $<0,5$ мм призводить до зростання показника міцності трамбованого вугілля (σ_{33}).

2. Зі збільшенням рівня помолу вугільних шихт з 90,1 до 92,2 % відбувається зростання величини показника міцності трамбованого вугілля (σ_{33}) з 12,5 до 15,0 кПа, тобто на 10 %. При збільшенні вологості шихти з 10,0 до 11,5 % міцність трамбованого пирога зростає. Збільшення вмісту вологи вище 12 % небажано через зниження міцності трамбованого вугільного пирога, а також збільшення витрат тепла на коксування, яке йде на випаровування вологи.

3. Встановлено, що збільшення спікливості і коксівності шихти з вмістом газового вугілля ≤ 40 % призводить до поліпшення показників механічної міцності доменного коксу.

4. Максимальний вплив на показники механічної міцності коксу, отриманого з вугільних шихт, що характеризуються підвищеним (більше 40 %) вмістом

вугілля газової групи, мають показники ступеня метаморфізму (V_{daf} , R_0) та тиску розпирання (P_{10}).

5. Достовірність отриманих результатів та висновків.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою задачі, мети та завдань дисертаційного дослідження, які розв'язуються послідовно та аргументовано. Достовірність наукових положень базується на основних принципах хімії та хімічної технології та підтверджується багатьма експериментальними дослідженнями, проведеними з використанням сучасного лабораторного обладнання та стандартизованих методів визначення властивостей (згідно ASTM, ISO, ДСТУ).

6. Практична цінність отриманих результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.

1. Експериментально доведено, що фактичні значення показників міцності трамбованого вугілля (σ_{zz}) для бінарних вугільних сумішей є вище розрахованих. Вихід основних хімічних продуктів коксування підпорядковується правилу адитивності і може бути розрахований загалом для підприємства з урахуванням показників якості та відсоткової участі насипних та трамбованих вугільних шихт.

2. Враховуючи можливе окислення вугільної сировини, а також неможливість прогнозувати вихід аміаку та сірководню за величиною виходу летких речовин, розроблено математичні залежності, що описують вихід усіх основних хімічних продуктів коксування за даними елементного складу вихідних трамбованих вугільних шихт.

3. З підвищенням вмісту газового вугілля (виходу летких речовин) у трамбованих вугільних шихтах знижується вихід коксу, а також підвищується вихід смоли, бензолу, вуглекислого газу, пірогенетичної вологи та коксового газу. Розраховано, що використання технології трамбування дозволяє знизити варість вугільної шихти на 32,5 \$/т.

4. Основні теоретичні положення та результати експериментальних досліджень, викладені в дисертації, використовуються у виробничій діяльності в Державному підприємстві «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)» та Приватному акціонерному товаристві «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» та в навчальному процесі на кафедрі технологій переробки нафти, газу та твердого палива Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень і результатів в опублікованих працях.

Дисертаційна робота має логічну структуру. Основні висновки повністю відповідають поставленим завданням дослідження та логічне витікають з отриманих результатів дослідження.

Проведено перевірку дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про високу індивідуальність дисертаційної

роботи. Використання результатів, отриманих іншими науковцями супроводжується відповідними посиланнями на відповідні джерела.

Всі основні положення та найбільш важливі наукові результати дисертації, опубліковані в необхідному обсязі у фахових наукових виданнях України та закордонних періодичних виданнях, пройшли відповідну апробацію на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Основні матеріали дисертаційної роботи представлені у 19 наукових праць, у тому числі 10 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та 9 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. Усі публікації містять результати роботи автора на окремих етапах виконання дисертаційної роботи та відображають основні її положення і висновки.

8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В дисертаційній роботі, при формуванні першого розділу, варто було приділити більше уваги розробкам вітчизняних науковців.

2. Формулювання наукової новизни дисертації вимагає додаткового обґрунтування щодо унікальності висновків.

3. Під час опису методу визначення міцності трамбованого вугілля і шихт не наводиться посилання на нормативну літературу у другому розділі. Це метод відноситься до стандартних чи до евристичних?

4. В експериментальній частині дисертації варто розрахувати та навести похибки з якими отримані рівняння регресії описують отримані результати.

5. В роботі присутні стилістичні помилки.

Слід відмітити, що зазначені вище недоліки та зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової і практичної цінності.

9. Висновки.

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково-обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка має важливе значення для галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія». Тема і зміст дисертації відповідають спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія».

З огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизну та практичну цінність, повноту викладення матеріалу в наукових публікаціях, відсутністю порушення академічної доброчесності, вважаю, що дисертація здобувача **Мукіной Наталі Володимирівни «Оптимізація виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування»** за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», повністю відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від

12.01.22р. № 44 та «Вимогам до оформлення дисертацій», затвердженими наказом МОН України від 12.01.17р. № 40, а її автор, Мукіна Наталя Володимирівна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія».

Рецензент – професор кафедри технології переробки нафти, газу та твердого палива Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н., доцент

Ірина СІНКЕВИЧ

Підпис Ю. І. Зайцев
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ЗАЙЦЕВ Ю. І.

