

ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу

Мукіної Наталі Володимирівни

«Оптимізація виробництва доменного коксу за допомогою
технології трамбування»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія
(галузь знань 16 – Хімічна інженерія та біоінженерія)

Актуальність теми

Вивчення рукопису дисертаційної роботи дозволило дійти висновку, що дисертаційна робота Мукіної Н. В. присвячена вирішенню **актуального науково-прикладного завдання** щодо оптимізації виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт, що характеризуються різним вмістом газового вугілля.

Економічний розвиток держав тісно пов'язаний з виробництвом сталі, зокрема, продукція зі сталі використовується у будівництві, транспорті, машинобудуванні та автомобільній промисловості, а також для виробництва побутової техніки. Ключову роль у структурі виробництва сталі відіграє конвертерний процес, в якому використовується чавун, вироблений у доменних печах (понад 70 % сталі, що виробляється у світі). Проблема якості коксу відіграє ключову роль у роботі доменних печей – основного реципієнта та споживача коксу. Динамічний технологічний розвиток сталеливарної промисловості, що спостерігався в останнє десятиліття, у тому числі щодо роботи доменних печей із зростаючим об'ємом і використання замічних 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. З точки зору економіки виробництва коксу вигідно виробляти високоякісний кокс із коксової шихти з максимально можливим вмістом більш дешевого вугілля. Тому виконання досліджень щодо оптимізації виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування є актуальним і практично доцільним так як ця технологія дозволяє використовувати велику кількість дешевого газового вугілля без зниження якості отриманого доменного коксу.

На підставі аналізу формальних сторін дисертації **Мукіної Н. В.**, вимог до оформлення та представлення результатів дослідження, можна дійти висновку, що поставлені в роботі завдання досліджень доведені до кінцевого логічного вирішення, а сама дисертація є завершеною науково-дослідною працею та відповідає встановленим на сьогодні вимогам.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.

Наукові положення, висновки, технічні рішення, що сформульовані в дисертаційній роботі, теоретично обґрунтовані, а їх достовірність підтверджується результатами експериментальних досліджень (розділи 3–5), що теоретично обґрунтовані автором. Усі висновки базуються на великому масиві аналітичних і експериментальних даних, одержаних з використанням сучасних стандартних і науково обґрунтованих методів досліджень.

Тема дисертаційної роботи **Мукіної Н. В. безпосередньо пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України** згідно з п. 3 «Енергетика та енергоефективність» і п. 4 «Раціональне природокористування» статті 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (зі змінами від 12.01.2023 р.), а також відповідає науковому напрямку Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» і виконувалась у межах проєктів «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»), де здобувач була виконавцем.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень (розділи 3–5), а також апробацією на 9 конференціях різного рівня, 3 актами упровадження у навчальний та науковий процеси (2), у виробництво (1).

Наукові положення, практичне значення та висновки дисертації логічно побудовані у контексті мети та сформульованих завдань, експериментально доведені та теоретично обґрунтовані.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації двома мовами, переліку умовних позначень, списку опублікованих праць за темою дисертації, вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 161 сторінку, з них: 52 рисунки (з них 47 – за текстом, 5 – на окремих сторінках), 87 таблиць (з них 64 – за текстом, 23 – на окремих сторінках), список використаної літератури зі 108 найменувань, 4 додатки на 8 сторінках.

До основних нових наукових результатів дисертації авторка відносить наступне:

- 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 трамбованості σ_{33} ;

- 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 %. За збільшення 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, що йде на випаровування води;

- встановлено, що збільшення спікливості та коксівності шихти з вмістом газового вугілля ≤ 40 % призводить до поліпшення показників механічної міцності доменного коксу;

- 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}).

Значимість отриманих результатів для практичного використання.

Практичну цінність дисертації авторка позиціонує у такий спосіб:

- експериментально доведено, що фактичні значення показників міцності трамбованого вугілля (σ_{33}) для бінарних вугільних сумішей є вище розрахованих. Вихід основних хімічних продуктів коксування підпорядковується правилу адитивності та може бути розрахований загалом для підприємства з урахуванням показників якості та відсоткової часті насипних і трамбованих вугільних шихт;

- 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 води та коксового газу. Розраховано, що використання технології трамбування дозволяє знизити варість вугільної шихти на 32,5 \$/т;

- 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» (акти упровадження наведено у додатках Б, В) та в навчальному процесі на кафедрі технологій переробки нафти, газу та твердого палива Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (акт упровадження наведено у додатку Г).

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень опубліковані у 19 працях, серед яких: 10 статей

у наукових фахових виданнях України, 9 тез у матеріалах конференцій різного рівня.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі (додаток А).

Опубліковані праці цілком відображають основний зміст дисертаційної роботи та відповідають вимогам пункту 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44.

Публікації здобувачки висвітлюють основні наукові положення дисертації, зокрема, ті, що автор виносить на захист, а також характеризують особистий внесок дисертанта.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Мукіної Н. В. складається зі вступу, анотації, списку опублікованих праць за темою дисертації, переліку позначень, символів та переліку скорочень, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та 4 додатків.

У вступі автором обґрунтовано актуальність обраної теми та завдань дослідження, сформульовані мета, об'єкт і предмет дослідження, та основні завдання дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, відзначена апробація результатів дисертації.

У першому розділі здобувачка здійснила аналітичний огляд вітчизняних і світових джерел інформації, щодо використання технології трамбування під час виробництва доменного коксу. Встановлено, що технологія трамбування вугільних сумішей для виробництва доменного коксу широко використовується у світі для використання низькометаморфізованого вугілля. Вугільна сировинна база коксохімічного виробництва 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, у той час як у вугільній шихті для виробництва коксу на к.б. № 5, 6 відбувається зниження частки високолеткого вугілля з одночасним збільшенням вмісту середньо-летких і низько-летких 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 (M10), за одночасно більш високих значеннях механічної міцності за показником подрібнюваності (M₂₅) і післяреакційної міцності (CSR).

У другому розділі авторкою охарактеризовано комплекс інструментальних, переважно, стандартизованих методів дослідження складу та 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 представлено 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, що можуть використовуватися для оптимізації технології підготовки трамбованої вугільної шихти до коксування. 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 $< 3 \text{ і } < 0,5 \text{ мм}$. Збільшення вмісту класів $< 3 \text{ і } < 0,5 \text{ мм}$ призводить до зростання міцності трамбованого пирога. Використовуючи отримані математичні залежності можна оптимізувати міцність трамбованого пирога вугільних шихт за допомогою зміни вмісту класів $< 3 \text{ і } < 0,5 \text{ мм}$.

Визначено, що фактичні значення σ_{33} для бінарних вугільних сумішей є вище розрахованих. Зі збільшенням рівня помелу вугільних шихт з 90,1 до 92,2 % відбувається зростання величини показника σ_{33} 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, що йде на випаровування води. Тобто, змінюючи вміст води у вугільній шихти, можна оптимізувати міцність її трамбованого пирога.

У четвертому розділі представлено результати лабораторних досліджень впливу 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 $\leq 40 \%$ 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 (Π_{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 доменного коксу, що продукується ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ».

У п'ятому розділі представлено результати експериментальних досліджень впливу 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 і 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.

Академічна доброчесність

Результати дослідження, що винесено автором на захист, отримані самостійно та містяться в опублікованих працях. У працях, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, що є результатом індивідуальних наукових пошуків (персональний внесок описано у додатку А).

Невідповідності вимогам академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації Мукіної Н. В., не виявлено.

Тема дисертаційної роботи Мукіної Н. В. безпосередньо пов'язана з **пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України** згідно з п. 3 «Енергетика та енергоефективність» і п. 4 «Раціональне природокористування» статті 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (зі змінами від 29.01.2021 р.).

Поставлені завдання у контексті сформульованої мети досягнуто та доведено до логічного завершення.

Відзначаючи загалом достатній науковий рівень дисертаційної роботи Мукіної Н. В., слід відзначити, що робота не позбавлена певних зауважень, дискусійних аспектів і рекомендацій, а саме:

1. Формулювання предмету дослідження подано у звуженому вигляді. У контексті мети дисертації, об'єкту дослідження доцільно було б доповнити формулювання властивостями вугілля, шихт.

2. За текстом дисертації не формалізовано гіпотезу дослідження, що, на думку опонента, викликало певні невідповідності у формулюванні наукової новизни. У формулюванні авторки *«наукова новизна отриманих результатів полягає у можливості оптимізації технології трамбування вугільних шихт з точки зору досягнення необхідних показників міцності трамбованого пирога та якості*

отриманого доменного коксу». Наукова новизна не може бути «...можливістю оптимізації...». У даному формулюванні це більше виглядає як гіпотеза досліджень.

3. Перший пункт формулювання наукової новизни дисертації вимагає додаткового тлумачення у контексті розуміння збільшення вмісту класів < 3 і $< 0,5$ мм призводить до зростання показника міцності трамбованого вугілля (σ_{33}).

4. Другий пункт практичного значення дисертації більше відображає наукову цінність досліджень.

5. У роботі авторка декларує про розроблення математичних залежностей, що описують вихід усіх основних хімічних продуктів коксування за даними елементного складу вихідних трамбованих вугільних шихт. Але опису, пояснення, оцінки адекватності не наведено. Тут необхідно додаткове пояснення.

6. У першому розділі бажано було б акцентувати увагу на доробках наукових шкіл України у даному науково-прикладному питанні.

7. У другому розділі авторка декларує про використання під час досліджень стандартних методик, але під час опису методу визначення міцності трамбованого вугілля і шихт не наводиться посилання на нормативну літературу. Це метод відноситься до стандартних чи до евристичних?

Анологічне запитання й до методу визначення виходу хімічних продуктів коксування.

8. Третій розділ дисертації призначено оптимізації підготовки вугільної шихти до коксування в умовах комплексу коксових батарей № 5, 6 кхв ПАТ «Арселорміттал Кривий Ріг». Але у висновках до розділу не достатньо обґрунтування сутності такої оптимізації.

9. У таблицях 4.12, 4.14, 4.27 наведено математичні залежності, отримані авторкою. У той же час описова частина в висновки 4-го розділу містить не достатньо інформації для розуміння наукового значення цих залежностей та можливості їх практичного застосування.

10. Вивчення 5 розділу дисертації виявило необхідність додаткового пояснення сутності оптимізації виходу хімічних продуктів коксування.

11. У висновках дисертації бракує глибини практичного обґрунтування щодо оптимізаційних процесів, задекларованих у меті наукової праці авторки.

12. У тексті дисертації зустрічаються редакційні, стилістичні та термінологічні помилки. Так, наприклад, автором часто вживаються такі конструкції «при температурі» замість «за температури», «рядом факторів» замість «низкою факторів» (стор. 9), «окислення» замість «окиснення» (стор. 13), тощо.

Однак, виявлені невідповідності не знижують науково-практичної цінності дисертаційної роботи. Наукова новизна, практичне значення результатів наявні та їх апробація аргументовані, кількість публікацій цілком достатня та їх зміст відповідають встановленим вимогам і відображають зміст дисертації.

Дана дисертаційна праця має чітко виражений прикладний характер.

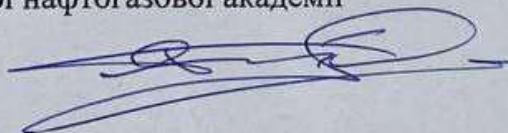
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Всебічний аналіз дисертаційної роботи **Мукіної Н. В.** «Оптимізація виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування» свідчить про те, що вона є завершеною, цілісною самостійною кваліфікаційною працею, логіка і внутрішня структура якої підпорядкована поставленій меті та завданням і вирішує важливе науково-прикладне завдання.

Теоретичне і практичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що представлені автором висновки й рекомендації знаходяться у контексті розвитку напрямів і пріоритетів інноваційного розвитку країни, зокрема, у сфері удосконалення (оптимізації) виробництва доменного коксу за допомогою технології трамбування, де вирішується завдання оптимізації виробництва доменного коксу з трамбованих вугільних шихт, що характеризуються різним вмістом газового вугілля для подальшого використання під час виробництва сталі.

За сукупністю якісних і формальних ознак щодо актуальності обраної теми, обґрунтованості наукових положень, практичного значення висновків і рекомендацій, їх достовірності й новизни дана праця відповідає вимогам, передбаченим Наказом Міністерства науки та освіти від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (зі змінами, внесеними Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019) та Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її авторка, **Мукіна Наталя Володимирівна**, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія (галузь знань 16 – Хімічна інженерія та біоінженерія).

Завідувач кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського,
доктор технічних наук, професор,
академік Української нафтогазової академії



Сергій БОЙЧЕНКО

Підпис професора Бойченка С. В. **ЗАСВІДЧУЮ:**
Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО