

**Спеціалізованій вченій раді Д26.224.01
При Інституті технічної теплофізики НАН України
вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03057**

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Жовміра Миколи Михайловича на дисертаційну роботу Скляренко Євгена Валентиновича на тему «Створення піролізної технології та установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

1. Актуальність теми дисертації

Зростання енергоспоживання та обмеженість енергетичних ресурсів стимулюють вдосконалення традиційних технологій виробництва енергії, а також розширення використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси.

Уряд України підписав Протокол про приєднання до Енергетичного співтовариства, що накладає на країну зобов'язання щодо розширення використання відновлюваних джерел енергії. Відповідно до «Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року», який затверджено розпорядженням №902-р Кабінету міністрів України 1 жовтня 2014р., у 2020 році вклад відновлюваних джерел енергії має становити 11% від споживання первинних енергоресурсів, при цьому річне споживання біомаси має досягти 4,85 млн. т н.е. В 2015 році споживання біопалив вже досягнуло 2,1 млн. т н.е., переважно деревної біомаси. Збільшення енергетичного споживання біомаси в опалювальний сезон 2016-2017рр. уже призвело до значного підвищення цін на тверді біопалива та нівелювання вартісних переваг їх використання. Підвищення ефективності енергетичного використання біомаси можливе при комплексній піролізній переробці біомаси з виробництвом більш цінних енергетичних ресурсів – піролізного газу, що придатний для виробництва теплової енергії в існуючих газових котлах, та біовугілля з його використанням як палива, для активації чи газифікації.

Теоретичні засади процесів піролізу біомаси вивчені достатньо детально. При переході ж до їх практичного застосування актуальним завданням є розробка технологічних процесів та обладнання придатних для промислового застосування, з можливістю їх безперервного здійснення з керованими режимами обробки біомаси та прогнозованими технічними показниками отримуваних продуктів, з забезпеченням прийнятних умов праці та захистом довкілля від можливих шкідливих впливів.

В дисертаційній роботі Скляренка Є.В. на тему «Створення піролізної технології та установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси», проведено дослідження націлені на створення безперервного процесу піролітичної переробки дрібно кускової рослинної біомаси з отриманням піролізного газу та біовугілля. Піролізний газ розглядається як перспективне паливо для використання в існуючих газових котлах для виробництва теплової



енергії, а біовугілля як додатковий високовартісний продукт, що забезпечує прискорену окупність інвестицій. З огляду на наведене, можна вважати тему дисертаційної роботи актуальною в науковому та прикладному аспектах. Дослідження з використання відновлюваних джерел енергії відносяться до пріоритетних напрямків розвитку науки в Україні.

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

Результати досліджень, що представлені в дисертації, проводились її автором протягом 2002-2016 років в Інституті технічної теплофізики НАНУ в рамках науково-дослідних робіт, зокрема, «Підвищення ефективності паливо використання при двоступеневому спалюванні твердого палива та оптимізація конструкцій паливних пристроїв» (№ ДР 0103U003752, 2005р.); «Підвищення ефективності спалювання низькосортних твердих палив шляхом термохімічної переробки», (№ ДР 0106U005113, 2008р.); в рамках проекту Copernicus II ENVIMAN, за підтримки Європейської Комісії (контракт № ICA2-CT-2000-10010). У зазначених науково-дослідних роботах дисертант брав безпосередню участь як виконавець.

3. Наукова новизна одержаних результатів

В роботі вирішене науково-технічне завдання щодо створення піролізного процесу конверсії біомаси в піролізний газ і біовуглець в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через його стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий шар біомаси. Нові наукові результати отримані автором полягають в наступному:

1. Удосконалено технологію термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець на базі піролізного процесу, що реалізується в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси.

2. Вперше досліджено і випробувано використання продуктів неповного згоряння вуглеводневих газів як газового теплоносія в піролізному процесі, що дозволило підвищити стабільність процесу і характеристик піролізного газу та дає можливість створювати, в перспективі, нові вуглець місткі матеріали.

3. Вперше експериментально отримано газовий теплоносії при змішаній конверсії природного газу в продуктах неповного згоряння з загальним надлишком повітря 0,5, що дозволило підвищити його теплотехнічні характеристики.

4. Експериментально досліджені і визначені основні гідромеханічні характеристики полідисперсного шару тріски нерегулярної форми, що дозволило визначити граничні параметри шару (товщину, фракційний розмір і дійсну швидкість фільтрації) та уточнити закономірності гідравлічного опору шару.

5. Розроблено і верифіковано математичну модель і програму розрахунку процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси на основі стехіометричної схеми ендотермічних реакцій і розрахунку констант швидкостей реакцій в ареніусівському наближенні, що дозволило здійснити розрахунок запропонованого піролізного процесу.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані. Автором проведено ряд експериментальних досліджень та розрахунків на основі удосконаленої математичної моделі процесу. Дослідження ґрунтуються на об'єктивних даних, отриманих автором, які детально представлені в дисертаційній роботі. Робота завершується висновками.

У **першому пункті** висновків констатується, що одним з найбільш ефективних шляхів використання рослинної біомаси є її комплексна піролізна конверсія в енергетичні і супутні продукти з високими споживчими характеристиками.

Висновок обґрунтовано матеріалами наведеним в підрозділі 1.4.

У **другому пункті** висновків автор розкриває суть удосконалення технологічного процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець на базі піролізного процесу, що реалізується в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси, що дозволило підвищити ефективність конверсії біомаси і зменшити питомі масогабаритні показники обладнання.

Висновок зроблено на основі матеріалів, наведених у підрозділі 2.1.

У **третьому пункті** висновків стверджується, що вперше досліджено і випробувано використання продуктів неповного згоряння вуглеводневих газів як газового теплоносія, що дозволило підвищити стабільність процесу і характеристик піролізного газу та покращити механічні характеристики біовуглецю.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених в підрозділах 2.3.3, 2.3.5 та 3.2.4.

У **четвертому пункті** висновків сказано, що вперше експериментально отримано газовий теплоносій при змішаній конверсії природного газу в продуктах неповного згоряння з загальним надлишком повітря 0,5, що дозволило підвищити його теплотехнічні характеристики;

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 2.3.4.

У **п'ятому пункті** висновків констатується, що експериментально досліджені і уточнені основні гідромеханічні характеристики полідисперсного шару тріски нерегулярної форми дозволили визначити граничні параметри шару (товщину, фракційний розмір і дійсну швидкість фільтрації);

Висновок обґрунтований матеріалами наведеними у підрозділі 2.3.2.

У **шостому пункті** висновків констатується розробка математичної моделі і програми розрахунку запропонованого процесу термохімічної конверсії, що були побудовані на стехіометричній схемі ендотермічних реакцій і розрахунку констант швидкостей реакцій в ареніусівському наближенні, завдяки чому удосконалено і спрощено розрахунки піролізного процесу;

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 3.1.

У **сьомому пункті** констатується, що базуючись на запропонованому методу розрахунку та експериментальних дослідженнях визначені основні технологічні параметри процесу (температура: теплоносія - 1000-1100°C, процесу піролізу – 450-500 °C, час конверсії – до 30 хвилин), та конструктивні особливості (реакційна зона не менше 1,3м, зона, яка необхідна для формування затиснутого шару, складає 1,2 – 1,5 діаметри шнека).

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 2.3.5, 3.2.4.

У **восьмому пункті** висновків стверджується, що на основі виконаних досліджень розроблено рекомендації щодо розрахунку технологічних параметрів процесу, основ конструювання реактора, вибору допоміжного обладнання та запропоновані технологічні схеми використання установок.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 3.2.4 та 4.1.3.

У **дев'ятому пункті** висновків стверджується, що розроблена, виготовлена і випробувана установка продуктивністю до 200 кг/год рослинної біомаси, яка продукує до 300нм³/годину горючого газу, з теплою згоряння до 6,6МДж/нм³ і 30-35 кг/годину біовуглецю і дозволяє скоротити шкідливі викиди. Термін окупності установки біля 2 років;

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділах 4.1.2 та 4.4.

У **десятому пункті** висновків стверджується, що вперше розроблена і створена діюча модель енерготехнологічної установки, де в якості газового теплоносія є продукти неповного згоряння власного піролізного газу, яка є мобільною і наближеною до ресурсної бази біомаси.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 4.1.1.

Результати експериментальних досліджень отримані з застосуванням сучасного обладнання, сертифікованих приладів та стандартизованих методик вимірювання величин, належною оцінкою похибок прямих та опосередкованих вимірювань.

Результати досліджень пройшли апробацію шляхом їх публікації в провідних вітчизняних та зарубіжних фахових виданнях, доповідями на вітчизняних та міжнародних конференціях.

5. Важливість отриманих автором результатів для науки і народного господарства, а також рекомендації щодо їхнього використання.

Запропонована математична модель та програма розрахунку можуть бути використані для розробки установок термохімічної конверсії різних видів твердої біомаси при фільтрації різних газових теплоносіїв через затиснутий рухомий шар біомаси.

На основі виконаних розрахункових і експериментальних досліджень визначено основні технологічні параметри запропонованого піролізного процесу і розроблено рекомендації по конструюванню і вибору обладнання при проектуванні енерготехнологічних установок а також технологічні схеми їх використання.

Матеріали дисертації застосовані для розробки технічного завдання ДП «УкрГіпроцукор» при створенні установки продуктивністю 200 кг/годину для КП «Київзеленбуд», при створенні дослідної установки ЕТУ-200 з використанням піролізного газу як теплоносія і в навчальному процесі у Національному авіаційному університеті.

Розрахунковий очікуваний економічний ефект від впровадження установки продуктивністю 200 кг/годину тріски складається з вартості заміщеного природного газу (біля 300тис.нм³) і вартості біовуглецю (250-280 т/рік).

Зважаючи на перспективність практичного застосування розробленого безперервного процесу термохімічної конверсії біомаси, вважаю за доцільне передати результати досліджень провідним вітчизняним організаціям лісового господарства та лісопереробної промисловості – Українському НДІ лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г.М. Висоцького (м. Харків) та Українському НДІ гірського лісівництва (м. Івано-Франківськ), сільського господарства – Об'єднанню «УкрНДІагропроект» (м Київ) для впровадження при проектуванні технологічних дільниць з переробки відходів та побічної продукції на підприємствах відповідних галузей.

6. Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах

Основні результати досліджень дисертаційної роботи опубліковані у 14 наукових працях, а саме: 6 статей у фахових наукових виданнях, що входять до переліку МОН України, 1 стаття у науково-технічному виданні, що індексується в наукометричних базах даних. Крім того отримані результати опубліковано у 2 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях, одержано 5 патентів України.

Кількість робіт та видання, в яких опубліковані статті автора, відповідають вимогам ДАК МОН України. Автореферат дисертації та опубліковані праці автора ідентичні за змістом основним положенням дисертації та в достатній мірі опубліковані у фахових наукових виданнях України.

7. Аналіз змісту дисертації та її завершеність

Дисертаційна робота, що подана на відгук, являє собою рукопис, обсяг якого складає 138 сторінок основної текстової частини, у т.ч. 35 таблиць і 51 рисунок, а також 11 додатків на 44 сторінках. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків за результатами досліджень і переліку використаних літературних джерел, який містить 105 найменувань.

У **вступі** автор обґрунтовує актуальність теми дисертації, формулює мету роботи, яка полягає у підвищенні ефективності використання енергетичного потенціалу рослинної біомаси, шляхом створення нової піролізної технології та установки для її термохімічної конверсії в піролізний газ і біовуглець, формулює задачі дослідження, обирає методи досліджень, визначає наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надає відомості про публікацію та апробацію результатів роботи, надає інформацію про особистий внесок у

досягнення поставленої мети.

У першому розділі викладено критичний аналіз відомих технологічних процесів конверсії біомаси, тенденції їх розвитку на сучасному етапі та перспективні напрямки їх застосування у енергетиці. Висвітлено практичні проблеми енергетичного використання деревних відходів міських лісопаркових господарств. Показано, що перспективним підходом у адаптації існуючого енергетичного обладнання газових котелень до використання рослинної біомаси є її попередня конверсія, зокрема піролізна, з отриманням нових газоподібних, рідких та твердих енергетичних продуктів. Серед піролізних процесів як перспективний для переробки дрібно дисперсної сировини вибрано піролізний процес у шнековому реакторі з затисненим шаром. На основі виконаного аналізу сформульована мета та основні задачі досліджень, які викладені наприкінці першого розділу.

У другому розділі наведено опис запропонованої за участі дисертанта технології термохімічної конверсії біомаси в піролізний газ і вуглець з використанням продуктів неповного згорання вуглеводневого палива, що дозволяє стабілізувати властивості продуктів піролізу біомаси та здійснювати технологічну обробку отриманого біовугілля. В цьому розділі виконано аналіз наявних літературних даних щодо їх придатності для обґрунтування умов здійснення запропонованого процесу.

На основі літературних даних автором виконано обґрунтування можливого діапазону доцільних значень температури процесу та швидкості нагріву, їх можливого впливу на вихід цільових продуктів та організацію технологічного процесу. Аналітично досліджено вплив вмісту вологи в біомасі та температури піролізу на його енергетичний баланс з метою вибору умов наближених до автотермічності процесу.

Аналізом літературних даних щодо гідравлічного опору шару зернистих матеріалів виявлена необхідність уточнення залежностей для визначення гідравлічного опору шару часток біомаси - деревної тріски, та отримано нові експериментальні дані необхідні для розрахунків створюваного обладнання.

Розраховано та експериментально доведено до необхідних характеристик пальник для отримання технологічного теплоносія шляхом конверсії природного газу з загальним надлишком повітря 0,5.

Виконано експериментальні дослідження зміни в часі середньої температури шару тріски залежно від розміру часток та товщини шару, зменшення в часі відносної маси шару вологої тріски, на основі яких отримано дані щодо необхідної товщини шару та середньої швидкості нагрівання до початку екзотермічних реакцій піролізу.

У третьому розділі викладено результати аналітичних та експериментальних досліджень впливу основних факторів на процес термохімічної конверсії біомаси. Розроблена математична модель процесу в якій враховано термічне розкладання біомаси з утворенням летких речовин, фіксованого та леткого вуглецю (сажі), протікання ендотермічних реакцій часток сажі з діоксидом вуглецю та водяною парою; тепловий баланс процесу включає міжфазовий теплообмін, тепловий потік через корпус реактора, тепловий ефект

ендотермічних хімічних реакцій, поглинання теплоти при випаровуванні вологи палива, тепловий ефект виходу летких речовин. Розв'язок отриманої системи рівнянь виконано числовим методом послідовних наближень.

Побудовано експериментальну установку на якій досліджено технологічні характеристики запропонованого процесу піролізу біомаси, які добре корелюють з результатами розрахунків згідно з розробленою його математичною моделлю.

У четвертому розділі наведено результати застосування отриманих даних при розробці промислових установок термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець. Описано конструктивний устрій основного та допоміжного обладнання, роботу установок, їх технічні показники, наведено загальні судження щодо техніко-економічної оцінки використання установок. Запропоновано технологічні схеми агрегування створених установок термохімічної конверсії біомаси з котлами на газовому та твердому паливі, когенераційними установками, виконані техніко-економічні оцінки ефективності інвестицій у їх реалізацію, що мають окупність від 1,3 до 3 років. Наведена оцінка впливу на атмосферне повітря при агрегуванні дослідно- експериментальної установки продуктивністю по біомасі 200кг/год з паровим котлом ДКВР-10; які показали певне зменшення викидів оксиду вуглецю та оксидів оксиду і відповідне зменшення екологічних платежів навіть при заміщенні використання природного газу.

У висновках сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Перелік використаної літератури містить 105 найменувань, з них цитувань на іноземних мовах (крім української та російської) 19 найменувань.

Додатки містять інформацію про патентування розробок, детальні дані результатів розрахунків процесу, виконання вимірювань, аналізів переробленої біомаси та отримуваних продуктів її переробки, документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

Усі чотири розділи дисертаційної роботи логічно пов'язані між собою і є цілісним завершеним дослідженням. Загалом виклад роботи та автореферату зрозуміло висвітлюють методи досліджень та отримані результати. Дисертаційна робота та автореферат написані українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

8. Зауваження по дисертаційній роботі.

1. На мою думку, наукову новизну за заявленими пунктами 2 та 3 доцільно об'єднати.

2. У науковій новизні за п. 4 у виразі «дозволило визначити граничні параметри шару (товщину, фракційний розмір і дійсну швидкість фільтрації)» з матеріалів дисертації не зрозуміло які визначені граничні значення мас «фракційний розмір».

3. В підрозділі 2.1 на с.57 стверджується «Основна ідея розробленої технології полягає в проведенні піролізу біомаси, в режимі «теплого удару» високопотенційним газовим теплоносієм, який фільтрується через її затиснутий

рухомий шар, що дозволяє за короткий час перевести значну частину органіки в газову фазу і зменшити вихід смол.» Це твердження входить у протиріччя з даними Bridgewater A. згідно з якими при швидкому нагріві відбувається розпад біомаси з переважним утворенням рідких продуктів та зменшенням утворення газів та біовуглецю.

4. В підрозділі 2.3.4 наведено дані про склад отримуваних продуктів конверсії природного газу з загальним надлишком повітря 0,5, але термодинамічного аналізу щодо можливості та повноти протікання реакцій 2.16 та 2.17 не наведено.

5. В підрозділі 3.1 при формулюванні математичної моделі процесу піролізу біомаси не враховано утворення пірогенетичної вологи.

6. На рис. 3.4 наведено дані про вихід і теплоту згорання летких залежно від температури процесу, але не описана методика отримання цих даних.

7. Підпис до рис. 21 в авторефераті та рис. 3.6 в дисертації є некоректним. Слід зазначити, що показаний вихід біовуглецю є нижчим, ніж його утворення при виконанні стандартного аналізу з визначення виходу летких з біомаси (0,18..0,21). В печах з повільним нагрівом біомаси вихід біовуглецю є значно вищим.

8. В підрозділі 3.2.4 не наведено даних матеріального та енергетичного балансу, що утрудняє аналіз отриманих дисертантом даних.

9. В підрозділі 4.1.2 «Техніко-економічна оцінка використання установок» наведено загальні судження, що не відповідають його назві та не дають відповіді про ефективність створеного процесу та обладнання. Разом з тим такі дані наведені у підрозділі 4.1.3 «Технологічні схеми впровадження установок».

10. У **третьому пункті** висновків вказується на покращення механічних характеристик біовуглецю, але даних про механічні характеристики отриманого біовуглецю в дисертації не наведено.

11. У **п'ятому пункті** висновків констатується, що експериментально досліджені і уточнені основні гідромеханічні характеристики полідисперсного шару тріски нерегулярної форми дозволили визначити граничні параметри шару (товщину, фракційний розмір і дійсну швидкість фільтрації). Разом з тим в підрозділі 2.3.2 відсутні дані щодо фракційного складу досліджуваних зразків полідисперсної тріски.

12. До дисертаційної роботи та автореферату є ряд редакційних зауважень. Не сприяє розумінню роботи відсутність ряду використаних позначень у їх переліку.

9. Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі

В цілому дисертація Скляренка Є.В. є самостійно виконаним завершеним науковим дослідженням, яке відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки в Україні.

В дисертації на основі виконаних експериментальних та розрахункових досліджень отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують конкретну наукову та практичну задачу - удосконалення піролізної

технології та створення установки безперервної дії для термохімічної конверсії біомаси в піролізний газ та біовуглець.

За напрямом обраних і вирішених завдань дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (напрямки досліджень «Створення нових, удосконалення наявних методів аналізу, розрахунку і інтенсифікації тепломасообміну в одно- та багатофазних середовищах, у теплових і гідродинамічних процесах в установках для виробництва та використання теплової енергії, технологічних пристроях і апаратах», «Дослідження процесів нагріву матеріалів з урахуванням термічних напружень, хімічних і фазових перетворень»).

Наведені зауваження до дисертаційної роботи не мають принципового характеру і не можуть істотно вплинути на її науковий рівень, новизну та достовірність отриманих результатів.

Враховуючи актуальність теми, достатній ступінь обґрунтованості, наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота «Створення піролізної технології та установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння наукового звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013р., до кандидатських дисертацій, а її автор Скляренко Євген Валентинович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, с. н. с.,

старший науковий співробітник

відділу відновлюваних органічних енергоносіїв

Інституту відновлюваної енергетики НАН України

Жовмір М.М.

Підпис М.В. Скляренко засвідчую
Зав. відділу кадрів



(М.В. Скляренко)