

ВІДГУК

офіційного опонента, директора Інституту відновлюваної енергетики
Національної академії наук України, доктора технічних наук,
член-кореспондента Національної академії наук України,
професора *Кудрі Степана Олександровича*

на дисертаційну роботу Гелетухи Георгія Георгійовича на тему “*Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива*”, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

Актуальність теми. Питання скорочення споживання викопних палив і переходу на відновлювані джерела енергії наразі є одним з найбільш актуальних загалом у світі, а також в Європі і в Україні. Це пов’язано як із загальною вичерпаністю ресурсів традиційних палив, так і з проблемою зміни клімату на Землі – глобальним потеплінням.

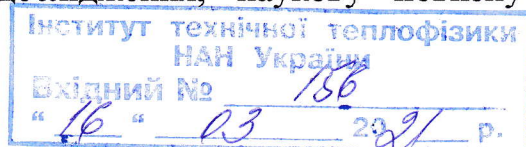
Для стримування процесу зміни клімату необхідно втілювати декарбонізацію економіки і енергетики, одним з потужних інструментів чого є використання відновлюваних джерел енергії. Серед відновлюваних джерел енергії важливу роль відіграє біомаса, особливо в країнах з її великим потенціалом, таких як Україна. Біомаса і вироблені з неї тверді, газоподібні і рідкі біопалива можуть використовуватися для виробництва теплової і електричної енергії, а також заміщати нафтове пальне на транспорті.

У зв’язку з розвитком споживання біомаси для енергетичних потреб постає питання точнішої оцінки наявного потенціалу біомаси, удосконалення існуючих технологій заготівлі біомаси, виробництва енергії з біологічних видів палива, подальшого дослідження і розробки інноваційних технологій і обладнання.

Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційної роботи *Г.Г. Гелетухи*, яка присвячена розробці наукових засад, теоретичних підходів і практичних напрямків виробництва енергії з біологічних видів палива, є безперечною.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 257 найменувань та двох додатків. Зміст роботи викладено на 332 сторінках основного тексту, 158 рисунків та 69 таблиць.

У *вступі* проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження, наукову новизну і



практичне значення отриманих результатів. Показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, а також особистий внесок дисертанта.

Перший розділ присвячено огляду, комплексному аналізу і порівнянню сучасного стану розвитку технологій виробництва енергії з біологічних видів палива в Україні та світі. Показано, що на сьогодні розвиток біоенергетичних технологій в Україні суттєво відстає від передових країн ЄС і світу. Особливо це стосується виробництва електроенергії з твердої біомаси і біогазу, частка якої у загальному виробництві електроенергії з відновлюваних джерел енергії є нетипово низькою у порівнянні з країнами ЄС.

Розглянуто і проаналізовано основні методологічні підходи для оцінки енергетичного потенціалу біомаси. Підкреслено необхідність у систематизації підходів до оцінки потенціалу біомаси для виробництва енергії та обґрунтуванні методики, адаптованої до сучасних умов господарювання в Україні.

Показано необхідність застосування комплексного підходу до аналізу життєвого циклу збирання і енергетичного використання біомаси, зокрема сільськогосподарських залишків, із врахуванням енергетичних, екологічних показників, а також критеріїв сталого розвитку.

За результатами проведених досліджень обґрунтовано можливість подальшого розвитку і вдосконалення технологій прямого спалювання і анаеробного зброджування біологічних видів палива; показано необхідність і перспективність розвитку виробництва і споживання біометану.

Сформульовано науково-прикладну проблему, яка полягає у недостатності існуючих закономірностей та наукових результатів для подальшого підвищення ефективності виробництва енергії і палива з біомаси, для достовірної оцінки енергетичного потенціалу біомаси в Україні, для дослідження процесів заготівлі біомаси, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля. Визначено основні завдання дослідження для вирішення вказаної проблеми.

У другому розділі представлено результати розробки методичних основ оцінювання енергетичного потенціалу біомаси. В запропонованій методиці оцінки уточнено відсоток теоретичного потенціалу побічної продукції виробництва сільськогосподарських культур, що може бути використаний для енергетичних потреб. Крім того, враховано внесок нових поточних та прогнозних складових потенціалу біомасу. Розроблена методика включає оцінку теоретичного, технічно досяжного та економічно доцільного потенціалу біомаси, придатної для енергетичного використання. Зроблено висновок, що частку побічної продукції агропромислового комплексу, яка може бути

використано для виробництва енергії, необхідно вирішувати індивідуально для кожного господарства.

З використанням розроблених засад оцінено поточний та перспективний енергетичний потенціали біомаси для України в цілому, а також для деяких областей України за кілька останніх років.

Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики в Україні до 2050 року, в якій представлено розподілення по видах біопалива, що будуть споживатися, а також по видах енергоносіїв, що будуть вироблятися з біопалива. Дисертантом переконливо обґрунтовано, що розвиток біоенергетики сприятиме заміщенню значної кількості природного газу, скороченню викидів парникових газів і створенню нових робочих місць в країні.

У *третьому розділі* наведено результати енергетичного та екологічного аналізу життєвого циклу використання поживних решток кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. У дисертаційну роботу ввійшли тільки питання, пов'язані зі збиранням і використанням побічної продукції виробництва кукурудзи на зерно, оскільки потенціал цього виду біомаси є одним з найбільших і перспективніших в Україні. При цьому питання застосування біопалива, отриманого з поживних решток кукурудзи, є наразі одними з найменш досліджених.

З огляду на енерго- та ресурсоефективність, а також низку інших факторів, рекомендовано трьохпрохідну систему заготівлі побічної продукції кукурудзи у великих прямокутних тюках, яка є оптимальною для подальшого використання даного виду біомаси в енергетичних цілях.

Дисертантом виконано енергетичний та екологічний аналіз життєвого циклу використання поживних решток кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. При цьому показники енергетичної та екологічної ефективності обрано як критерії сталості, що є важливим при виробництві та споживанні біомаси як палива. Проведено адаптацію методик розрахунку показників енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів до особливостей життєвого циклу виробництва теплової енергії з твердого біопалива.

Важливим отриманим результатом є те, що використання побічної продукції виробництва зернової кукурудзи у вигляді великих тюків при відстані транспортування сировини до 50 км забезпечує зниження споживання первинної енергії викопного палива у 10 та більше разів. Використання гранул та брикетів з даного виду біомаси зменшує споживання первинної енергії викопного палива у понад 5 разів.

Проаналізовано можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України.

Оцінено, що для створення привабливих умов для ТЕЦ на біомасі працювати на ринку пікових електричних навантажень, потрібний тариф на обсяг електроенергії, виробленої в періоді пікового споживання, на рівні 0,273-0,279 євро/кВт·год в залежності від схеми відпуску електроенергії в мережу. Тариф на електричну енергію, вироблену піковими потужностями на біогазі, повинен складати 0,266 євро/кВт·год. Важливим є висновок про те, що найбільш перспективною опцією для роботи в «пікових» режимах може бути робота когенераційних установок на біометані, для яких відповідний тариф має становити 0,123-0,166 євро/кВт·год.

Четвертий розділ присвячено результатам експериментального дослідження технологій прямого спалювання і анаеробного зброджування біологічних видів палива, розробленню та вдосконаленню технологій і обладнання для виробництва з них енергії.

Удосконалено технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу шляхом запровадження «глибокої» реторти з решітками допалювання. Запропонована конструкція реторти дозволяє досягати високої інтенсивності горіння в широкому діапазоні вологості палива.

Розроблено методику теплотехнічних випробувань, адаптовану до котлів ємкісного типу з періодичним спалюванням цілих тюків соломи. Із застосуванням цієї методики досліджено теплопродуктивність, експлуатаційні показники та емісійні характеристики теплогенератора при періодичному спалюванні тюків соломи. Шляхом експериментального підбору ряду конструктивних та експлуатаційних параметрів досягнуто стабільне вигорання та усунення неповноти згорання тюка, забезпечення стабільних показників потужності котла, зменшення емісії CO.

Дисертантом отримано нові експериментальні дані про ефективність анаеробного зброджування пожнивних решток пшениці, кукурудзи та соняшнику, що є науковим підґрунтям для подальшого розвитку технологій виробництва біогазу з біомаси аграрного походження. Визначено, що тип пожнивних решток та спосіб їх попередньої обробки впливає на швидкість виходу біогазу. Серед досліджених типів найбільш інтенсивний вихід біогазу спостерігався при зброджуванні гранул з соломи пшениці та досліджених зразків стебел кукурудзи.

У **п'ятому розділі** виконано техніко-економічне обґрунтування технологій виробництва енергії з біологічних видів палива. Дисертантом суттєво вдосконалено методичні засади фінансового аналізу інвестиційних проєктів, які адаптовано для застосування у біоенергетичних проєктах.

Виконано техніко-економічне обґрунтування виробництва брикетів та гранул з побічної продукції кукурудзи для різних значень продуктивності ліній брикетування і гранулювання. При проведенні техніко-економічного обґрунтування функціонування біогазових установок розглянуто дві альтернативні схеми отримання доходу від реалізації електричної енергії – за діючим «зеленим» тарифом до 2030 р. та за схемою аукціонів, коли тариф на електроенергію може бути нижчим від «зеленого» тарифу, але при цьому встановлюється терміном на 20 років. Визначено, що виробництво біометану з біогазу пов'язане з додатковими витратами на розділення метану і вуглекислого газу, через що одиниця енергії в біометані коштує дорожче, ніж у біогазі. Проте напрямок виробництва і використання біометану відкриває нові перспективні можливості в енергетиці.

У *висновках* сформульовано основні наукові результати.

У *додатках до дисертаційної роботи* наведено список публікацій дисертанта за темою представленої роботи, копії чотирьох актів впровадження результатів роботи, копії двох листів про активну участь дисертанта у розробленні та обговоренні низки законів України в секторі альтернативної енергетики.

Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній:

1) Вперше із застосуванням методології оцінки життєвого циклу розроблено наукові засади виробництва теплової енергії з побічної продукції кукурудзи.

2) Вперше запропоновано математичну модель розрахунку енергетичної та екологічної ефективності виробництва і споживання біопалива з пожнивних решток кукурудзи з врахуванням критеріїв сталості

3) Вперше розроблено науково-методичні засади теплотехнічних випробувань і проектування водогрійних котлів з топковим пристроєм на основі глибокої реторти з решітками допалювання при спалюванні деревної тріски вологістю до 50%.

4) Вперше розроблено науково-методичні засади теплотехнічних випробувань і проектування водогрійних котлів періодичної дії при спалюванні цілих тюків соломи.

5) Вперше встановлено закономірності виходу біогазу при розпаді пожнивних решток в періодичному мезофільному процесі анаеробного зброджування для кількох видів пожнивних решток при різних способах їх попередньої обробки.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в наступному:

1) Удосконалено технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу.

2) Проведено підбір оптимальних режимів спалювання великих тюків соломи в експериментальних зразках теплогенераторів.

3) На основі виконаного аналізу зроблено висновок про перспективність використання побічної продукції кукурудзи як палива, що має достатньо хороші паливні характеристики.

4) За методологією оцінки життєвого циклу виконано аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні побічної продукції кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії.

5) Визначено передумови для можливості практичного застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України.

6) Експериментально підтверджено, що пожнивні рештки сільськогосподарських культур є придатними для виробництва з них біогазу шляхом метанової ферментації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням фундаментальних законів класичної теорії, комплексним та послідовним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на численних міжнародних та національних науково-технічних конференціях, великою кількістю проведених експериментів. Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якійсь та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 90 наукових публікаціях, серед яких: 5 монографій, 1 з яких видана за кордоном, 2 колективні монографії, 6 посібників, 56 статей у фахових періодичних виданнях, зокрема 8 публікацій в іноземних виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 9 публікацій в збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 1 патент України.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на 130 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.
Оформлення автореферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Основний зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

1. При визначенні економічно доцільного потенціалу біомаси взято до уваги тільки потреби рослинництва й тваринництва у даних видах біомаси без врахування інших факторів, напряму пов'язаних з економічними показниками.
2. В роботі не наведено результати оцінки технічно досяжного потенціалу біомаси або обґрунтування того, чому дисертант вважає більш важливими для розгляду лише теоретичний та економічний потенціали біомаси.
3. При аналізі життєвого циклу енергетичного використання побічної продукції виробництва кукурудзи основна увага приділена «підсистемі заготівлі» (сировинний цикл), тоді як «підсистема перетворення» (виробництво теплової енергії) висвітлена менш детально, хоча є не менш важливою.
4. В роботі зазначено переваги використання побічної продукції виробництва кукурудзи, детально описано технології її заготівлі і виконано оцінку життєвого циклу (розділ 3). Але при цьому майже всі експериментальні дослідження присвячено іншим видам біомаси – деревини і соломі (розділ 4). Таким чином, окрім анаеробного зброджування, не наведено результатів дослідження енергетичного перетворення побічної продукції кукурудзи.
5. В роботі не наведено результатів ТЕО заготівлі і енергетичного використання соломи (розділ 5), тоді як експериментальному дослідженню виробництва теплової енергії з соломи присвячено значну увагу (розділ 4).
6. На мою думку, низку розроблених в роботі положень і технічних рішень варто було би захистити патентами, чим підтвердити свій пріоритет.
7. На с. 124 в таблиці 3.4 наведені дані про склад та паливні характеристики деревини та сільськогосподарської біомаси без посилання на джерело даних. За текстом роботи нема пояснень щодо джерела даних або методик їх визначення дисертантом.
8. На рис. 3.7 наведені дані про нижчу теплоту згорання кукурудзиння без посилання на джерело цих даних.
9. На рис. 3.5 наведено дані про потоки рослинних решток при збиранні кукурудзи, а на с. 126 пояснення про перерозподіл цих потоків при

збиранні комбайнами, оснащеними жатками. До рис. 3.5 та у тексті на с. 126 немає посилань на джерела цих даних.

10. У таблиці 3.5 наведено аналіз сировинного циклу використання тюків кукурудзиння в якості палива. В цій таблиці наведені дані про витрату палива на проведення кожної технологічної операції без посилання на джерело, по тексту розділу посилання також відсутні.
11. У списку літератури до дисертації окремі джерела повторюються, зокрема 56 та 179.

Загальні висновки

Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують його наукової новизни та практичної значимості і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота *Г.Г. Гелетухи* “*Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива*”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії, є завершеною науковою працею, в якій вирішено нову науково-прикладну проблему, яка полягає у розвитку теоретичних засад, методологічного апарату та вдосконаленні технологій виробництва енергії з біологічних видів палива, що сприятиме ефективнішому впровадженню цих технологій. Дисертаційна робота відповідає вимогам паспорту наукової спеціальності 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії, а також вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р., а її автор, *Георгій Георгійович Гелетуха*, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

Офіційний опонент,
директор Інституту відновлюваної
енергетики НАН України, доктор технічних
наук, член-кореспондент НАН України,
професор



Кудря С.О.