

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

ГЕЛЕТУХА Георгій Георгійович



УДК 620.92

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ З
БІОЛОГІЧНИХ ВИДІВ ПАЛИВА**

05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Науковий консультант: доктор технічних наук, ст.н.с.,
член-кореспондент НАН України
Клименко Віктор Миколайович,
Інститут технічної теплофізики НАН
України, завідувач відділу теплофізичних проблем
систем теплопостачання

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Кудря Степан Олександрович,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
директор

доктор технічних наук, професор,
Голуб Геннадій Анатолійович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України, професор кафедри
тракторів, автомобілів та біоенергосистем.

доктор технічних наук, професор,
Кухарець Савелій Миколайович,
Поліський національний університет, завідувач
кафедри механіки та інженерії агроєкосистем.

Захист відбудеться “30” березня 2021 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.02 Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. М. Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. М. Капніст, 2а.

Автореферат розіслано “15” лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.02,
к.т.н.



О.Л. Декуша

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сталий розвиток біоенергетики дає можливість зменшити залежність країни від імпортованих енергоносіїв, забезпечити ефективне використання місцевих ресурсів, розвивати місцеву економіку за рахунок надходження податків та зборів, покращити торгівельно-платіжний баланс країни через зменшення обсягів імпорту енергоносіїв. Соціальний вплив очікується завдяки створенню нових робочих місць та зниженню тарифів на теплову енергію. Позитивний екологічний вплив обумовлений тим, що біомаса є CO₂-нейтральним паливом.

Вагомий внесок в розвиток науково-технічних засад виробництва енергії з біологічних видів палива зробили вітчизняні вчені Блюм Я.Б., Роїк М.В., Рахметов Д.Б., Забарний Г.М., Карп І.М., П'яних К.Є., Кудря С.О., Лакіда П.І., Калетник Г.М., Ткаченко С.Й., Губінський М.В., Дубровін В.О., Мельничук М.Д., Голуб Г.А., Кухарець С.М., Жовмір М.М., Железна Т.А., Драгнєв С.В., Матвєєв Ю.Б., Кучерук П.П., а також закордонні вчені Andre P.C. Faaij, Ingwald Obernberger, Jens Bo Holm Nielsen, Daniela Thrän, Amon T., Angelidaki I., Batstone D.J., Wolter Elbersen, Manolis Karampinis. Проте цілий ряд науково-технічних проблем пов'язаних з технологіями виробництва енергії з біологічних видів палива і надалі потребують свого вирішення. Саме тому, розвиток науково-технічних засад виробництва енергії з біологічних видів палива є актуальним питанням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відділі теплофізичних проблем систем теплопостачання Інституту технічної теплофізики НАН України. Основні результати роботи одержано при виконанні наступних науково-дослідних робіт: Прикладна робота № 1.7.1.824 «Розробка теплотехнологічних заходів щодо виробництва теплової енергії в котельних комунального господарства з використанням місцевих палив» (2009-2011pp.); Прикладна робота № 1.7.1.850 «Дослідження процесів і технологій виробництва теплоти та електроенергії з біомаси». 2012 – 2014 pp., постанова бюро ВФТПЕ НАН України від 06.12.2011 р. протокол № 17, §91, № держреєстрації 0112U005080; Прикладна робота № 1.7.874 «Дослідження та вдосконалення технологій спалювання та анаеробного зброджування біомаси аграрного походження». 2015 – 2019 pp., постанова бюро ВФТПЕ НАН України від 30.09.2014 р. протокол № 13, §70, № держреєстрації 0115U000773; Міжнародний контракт з компанією «RSJ Investments investiční společnost a.s.» (Чехія) № 3003/2018 «Вибір регіону України для можливостей інвестування в біоенергетичний проект». Науковий керівник цих проектів - к.т.н. Гелетуха Г.Г.

Мета і завдання дослідження. *Мета дослідження* – підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива при спалюванні та анаеробному зброджуванні шляхом розроблення науково-технічних засад процесів заготівлі, обробки аграрної біомаси та виробництва енергії з твердих видів біопалива, біогазу і біометану.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- розробити науково-технічні засади оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, в яких буде уточнено відсоток теоретичного потенціалу побічної продукції (ПП) виробництва сільськогосподарських (с-г) культур, що може бути використаний для виробництва енергії, а також буде враховано нові поточні та прогнозні складові цього потенціалу; на основі розробленої методики оцінити енергетичні потенціали біомаси ряду областей та України в цілому;
- розробити дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка враховуватиме динаміку застосування твердих біопалив, біогазу, біометану, рідких біопалив при виробництві теплової та електричної енергії, а також в якості моторних палив;
- визначити для умов України технічні можливості збирання і енергетичного використання ПП виробництва кукурудзи на зерно (надалі – ПП кукурудзи), які базуватимуться на аналізі економічно доцільних технологій заготівлі та виборі технічних засобів для їх виконання, беручи до уваги передовий світовий досвід;
- виконати аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії;
- проаналізувати можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України;
- вдосконалити технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, яка дозволить розширити застосування технології на деревне паливо з підвищеною вологістю;
- вдосконалити технологію спалювання тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії, в якій будуть забезпечені більш стабільні показники поточної теплової потужності котла та зниження емісії CO₂;
- вдосконалити технологію спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в якій буде організоване безперервне стабільне спалювання тюків соломи та забезпечено зниження викидів шкідливих речовин;
- отримати нові дані щодо показників виходу біогазу при розпаді пожнивних решток аграрно-промислового комплексу (АПК) в періодичному мезофільному процесі анаеробного зброджування;
- виконати техніко-економічні обґрунтування (ТЕО) ряду нових і перспективних для України біоенергетичних технологій: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків; виробництва і використання біометану.

Об'єкт дослідження – процеси виробництва енергії з біологічних видів палива.

Предмет дослідження – науково-технічні засади спалювання і анаеробного зброджування біомаси та закономірності викидів забруднюючих речовин і парникових газів при виробництві енергії з біологічних видів палива.

Методи дослідження – теоретичні та експериментальні методи і методики дослідження спалювання і анаеробного зброджування біомаси, енергетичного потенціалу біомаси, аналізу життєвого циклу, техніко-економічного обґрунтування технологій виробництва енергії з біомаси, які базуються на теорії вимірювань, теплообміну, математичної статистики, методах комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше із застосуванням методології оцінки життєвого циклу розроблено наукові засади виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи, які дали можливість встановити, що використання великих тюків ПП кукурудзи забезпечує зниження споживання первинної енергії викопного палива у 10 та більше разів, а використання гранул та брикетів – у понад 5 разів.

2. Вперше запропоновано математичну модель розрахунку енергетичної та екологічної ефективності виробництва і споживання біопалива з пожнивних решток кукурудзи з врахуванням критеріїв сталості, яка пов'язує коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії та скорочення викидів парникових газів з відстанню транспортування ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів, що дало можливість оцінити енергетичну та екологічну ефективність виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи у котлі потужністю 500 кВт.

3. Вперше на основі експериментальних досліджень встановлено закономірності зв'язків інтенсивності горіння та рівня емісії забруднюючих речовин при спалюванні відходів деревини в котлах з топковим пристроєм на основі глибокої реторти з колосниками допалювання від коефіцієнту надлишку повітря та вологості палива, що дозволило вдосконалити технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, використовувати деревне паливо з вологістю до 50%, збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази та зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50%.

4. Вперше встановлено закономірності зв'язків поточної теплової потужності та рівня емісії забруднюючих речовин при спалюванні тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії від способів подачі та швидкості повертання сопел вторинного дуття, а також від вологості соломи, що дозволило вдосконалити технологію спалювання тюків соломи в водогрійних котлах періодичної дії, досягнути рівномірного вигорання тюка, забезпечити стабільні показники потужності котла, зменшити емісії CO.

5. Вперше встановлено закономірності, які пов'язують потенціал та швидкості виходу біогазу при розпаді пожнивних решток в періодичному мезофільному процесі анаеробного зброджування з видом пожнивних решток, способом їх попередньої обробки та початковою концентрацією органічної речовини в реакторі, що дозволило розширити сировинну базу біогазових установок пожнивними рештками сільськогосподарського виробництва.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Оцінено енергетичний потенціал біомаси в Україні в 2018 та в 2050 рр. та енергетичний потенціал біомаси ряду областей в 2014-2016 рр.

2. Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка буде використана при розробці Національного плану дій з відновлюваної енергетики до 2030 року і оновленні Енергетичної стратегії України.

3. Визначено можливості збирання і енергетичного використання поживних решток кукурудзи.

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

5. Розроблено, виготовлено та досліджено експериментальний котел ретортного типу потужністю 100 кВт для спалювання деревного палива вологістю до 50%.

6. Розроблено, виготовлено та досліджено дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів потужністю 100, 250 та 350 кВт, в яких забезпечено стабільні показники поточної теплової потужності котла та зменшення емісії CO.

7. Отримала подальший розвиток технологія спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в яких організовано безперервне стабільне спалювання малих тюків соломи та забезпечено помірні викиди шкідливих речовин.

8. Проведено експериментальні дослідження та отримано нові дані щодо показників виходу біогазу при анаеробному зброджуванні поживних решток АПК, які є науковим підґрунтям для подальшого розвитку технологій виробництва біогазу з лігноцелюлозної агросировини.

9. Виконано ТЕО ряду біоенергетичних технологій : заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування ПП АПК; виробництва і використання біометану.

10. Внесено пропозиції, що були враховані, до законів України «Про альтернативні джерела енергії» та «Про теплопостачання». Розроблено проекти законів України щодо впровадження системи електронної торгівлі біопаливом; створення конкурентного ринку теплової енергії; запровадження підтримки вирощування енергетичних культур; відміни податку на викиди CO₂ для біоенергетичних установок; підтримки виробництва та споживання біометану.

Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема:

- Технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу впроваджено у ТОВ «Волинь-Кальвіс».

- Технології спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії та спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу впроваджено у ТОВ «Котлозавод «Крігер».

- Результати експериментальних досліджень анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника) впроваджено у ПрАТ «МХП Еко Енерджи».

- Методику оцінки енергетичного потенціалу біомаси України та ТЕО заготівлі побічної продукції кукурудзи, виробництва гранул і брикетів з побічної продукції кукурудзи, анаеробного зброджування аграрних відходів і залишків,

виробництва і використання біометану впроваджено у навчальному процесі кафедри економічної теорії факультету аграрного менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України.

- Розроблені проекти законів передано в Держенергоефективності та комітет ПЕК і ЖКГ Верховної Ради України.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, які виносяться на захист, отримані автором особисто на основі узагальнення результатів дослідження. В дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам у спільно опублікованих наукових працях.

Роботи [11,14,15,74] написані здобувачем одноосібно. У роботах написаних у співавторстві здобувачу належить аналіз стану проблеми та вибір напрямку досліджень [12,13,16,17,18,19,21,25,27,28,29,30,33,34,35,36,37,40,41,43, 46,47,48, 49,50,52,53,54,57,58,59,64,65], обґрунтування ключових наукових положень [5,6, 55,56,60,61,62,63], постановка завдань і обґрунтування ключових технічних рішень [22,23,44,45,51], обґрунтування методів та розроблення методики дослідження [3,4,7,8,9,10,20,24,26,31,32,38,39,42], підготовка і написання окремого підрозділу монографії/ посібника [1,2,76,77,78,79,80,81, 82,83,84,85,86, 87].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на профільних наукових конференціях: щорічні Міжнародні конференції «Проблеми промислової теплотехніки» та «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 2003-2019 рр., Київ, Україна; щорічні Міжнародні конференції «Енергія з біомаси» 2004-2019 рр., Київ, Україна; 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany; International Conference “Progress in Biogas – Biogas production from agricultural biomass and organic residues”, 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany; 16th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Industry and Markets, 2-6 June 2008, Valencia, Spain; 17th European Biomass Conference & Exhibition “From Research to Industry and Markets”, 29 June-03 July 2009 Hamburg, Germany; 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France; 4th Bioenergy Week 21-24 June 2016, Budapest, Hungary; 5th Central European Biomass Conference, 18 - 20 January 2017, Graz, Austria; 2017 AEBIOM Conference, 21-22 листопада 2017, Брюссель, Бельгія; «EU4Energy Vienna Policy Forum: Bioenergy for Heat», 24 April 2018, Vienna, Austria. За результатами роботи зроблено 32 доповіді на міжнародних конференціях за кордоном і 100 доповідей на конференціях в Україні.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 90 наукових праць, 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.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 257 найменувань, 2 додатків та включає 332 сторінки основного тексту, 158 рисунків і 69 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку технологій виробництва енергії з біологічних видів палива в Україні та світі. Загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів становило 3362 тис. т н.е., що еквівалентно заміщенню 4,2 млрд м³/рік природного газу.

Проаналізовано роботи з наукових аспектів виробництва енергії з біологічних видів палива вітчизняних вчених Блюма Я.Б., Роїка М.В., Рахметова Д.Б., Забарного Г.М., Карпа І.М., П'яних К.Є., Кудрі С.О., Лакіди П.І., Калетника Г.М., Ткаченко С.Й., Губінського М.В., Дубровіна В.О., Мельничука М.Д., Голуба Г.А., Кухарця С.М., Жовміра М.М., Железної Т.А., Драгнева С.В., Матвєєва Ю.Б., Кучерука П.П., а також закордонних вчених Andre P.C. Faaij, Ingwald Obernberger, Jens Bo Holm Nielsen, Daniela Thrän, Amon T., Angelidaki I., Batstone D.J., Wolter Elbersen, Manolis Karampinis. На основі проведеного аналізу визначено основні методичні, технологічні та організаційні проблеми, вирішення яких необхідне для широкої і успішної реалізації біоенергетичних проєктів в Україні.

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

Другий розділ присвячено розробленню стратегічних засад виробництва і використання біопалив в Україні. Розроблено методичні основи оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, в якій уточнено відсоток теоретичного потенціалу ПП с-г культур, що може бути використаний для виробництва енергії, а також враховано нові поточні та прогнозні складові цього потенціалу. Питання про частку ПП АПК, що може бути використано для виробництва енергії, необхідно вирішувати індивідуально для кожного господарства. Для України у цілому автором рекомендовано враховувати у енергетичному потенціалі до 30% теоретичного потенціалу соломи зернових колосових культур і до 40% теоретичного потенціалу ПП інших с-г культур. Оцінено енергетичні потенціали біомаси ряду областей в 2014-2016 рр. та України в цілому в 2018 та 2050 рр. В 2018 році для України він становив 23,1 млн т н.е./рік (Табл. 1). У 2050 р. цей потенціал може збільшитися до близько 45 млн т н.е./рік.

Табл. 1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2018 р.).

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н.е.
Солома зернових колосових культур	32,8	30	3,36
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
ПП кукурудзи (стебла, стрижні)	46,5	40	3,56
ПП соняшника (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні залишки сільського господарства (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки)	8,8	96	2,06
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН*)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,82
Біогаз з відходів і ПП АПК	2,8 млрд м ³ СН ₄	42	0,99
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів (ТПВ)	0,6 млрд м ³ СН ₄	29	0,14
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	0,4 млрд м ³ СН ₄	28	0,09
Енергетичні культури:			
- верба, тополя, міскантус (на 1 млн га);	11,5	100	4,88
- кукурудза на біогаз (на 1 млн га).	3,0 млрд м ³ СН ₄	100	2,57
Всього	-	-	23,1

* ОВБСН – обрізка та викорчовування багаторічних с-г насаджень.

Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р. (Рис. 1).



Рис. 1. Структура використання біопалив в Україні до 2050 р., млн т н.е.

Показано, що розвиток біоенергетики дозволить замінити до 20 млрд м³/рік природного газу і створити понад 160 тис. робочих місць до 2050 р. (Табл. 2).

Табл. 2. Узагальнені показники Дорожньої карти розвитку біоенергетики України до 2050 року.

Рік	Встановлена потужність		Споживання біопалива*, млн т н.е.	Заміщення природного газу, млрд м ³	Зміщення бензину та дизельного пального, млн т	Скорочення викид. CO ₂ , млн т/рік	Інвестиції, млрд євро		Створення робочих місць, од.
	МВт _Т	МВт _{Тел}					мін.	макс.	
2020	8206	202	3,77	4,34	0,17	8,90	1,52	2,52	16914
2025	12276	844	5,83	6,35	0,25	14,31	3,73	6,06	31438
2030	19087	1846	8,57	9,11	0,39	21,35	7,07	11,44	54302
2035	30237	2804	12,01	12,62	0,50	30,37	10,78	17,43	86237
2040	39338	3609	15,13	15,77	0,67	38,66	14,15	22,85	115439
2045	45351	4299	17,64	17,98	0,96	45,79	16,94	27,38	139013
2050	49655	5230	20,28	19,92	1,23	54,40	19,70	31,81	162710

* Включаючи рідкі та газоподібні біопалива для транспорту.

Третій розділ присвячено розробленню наукових засад виробництва енергії з біологічних видів палива. У роботу ввійшли тільки питання, пов'язані з ПП кукурудзи, які є найменш дослідженими і одними з найбільш перспективних. Загалом, ПП кукурудзи має достатньо хороші паливні властивості, близькі до властивостей деревного палива. Зокрема, стебла кукурудзи мають відносно високу температуру плавлення золи (1050-1200 °С) у порівнянні з золою соломи (800-1000 °С). Завдяки цьому біопаливо, виготовлене із кукурудзиння, може спалюватися в котельному обладнанні, призначеному для деревної біомаси.

Проаналізовано чотири можливі для умов України технології заготівлі ПП кукурудзи: у великих прямокутних тюках, рулонах, подрібненому вигляді із використанням кормозбирального комбайна і причепа-підбирача. Рекомендовано трьохпрохідну систему заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках, що включає комбайн, трактор з мульчувачем-валкоутворювачем і трактор з прес-підбирачем.

Виконано енергетичний та екологічний аналіз життєвого циклу використання поживних решток кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. В якості показників енергетичної ефективності обрано приведені питомі сукупні витрати первинної енергії та коефіцієнт перетворення енергії.

Загальне споживання первинної енергії системою виробництва продукту, приведені до її річного періоду роботи, визначається як величина приведених сукупних витрат енергії (CED):

$$CED = E_{\text{сир}} + E_{\text{пер}} + B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}, \text{ [ГДж/рік]} \quad (1)$$

де $E_{\text{сир}}$ – витрати первинної енергії під час операцій сировинного циклу використання біомаси в якості палива, ГДж/рік; $E_{\text{пер}}$ – витрата первинної енергії у підсистемі перетворення палива в теплову енергію, ГДж/рік; V – витрата палива, т/рік; Q_{H}^{P} – нижча теплотворна здатність біопалива, МДж/кг.

Сукупні приведені витрати первинної невідновлюваної енергії, що враховують витрати тільки викопних палив:

$$CED_{\text{NR}} = E_{\text{сир}} + E_{\text{пер}}, \text{ [ГДж/рік]} \quad (2)$$

Показник CED_{NR} відображує обсяги використання та заощадження невідновлюваних енергоносіїв. Оскільки саме величину скорочення споживання первинної енергії викопного палива визначено у якості критерію сталого розвитку, показник CED_{NR} обрано як основний в даному дослідженні.

Оцінка енергетичної ефективності полягає у визначенні сукупних приведених витрат первинної енергії (CED), під час життєвого циклу використання біопалива для виробництва теплової енергії, та їх порівнянні з тепловою енергією «на виході» з енергетичної установки (CEP , ГДж/рік):

$$ced = CED/CEP; \quad ced_{\text{NR}} = CED_{\text{NR}}/CEP \quad (3)$$

Коефіцієнт перетворення енергії – величина, обернено пропорційна питомим приведеним сукупним витратам енергії:

$$EYC = ced^{-1}; \quad EYC_{\text{NR}} = ced_{\text{NR}}^{-1} \quad (4)$$

Згідно рекомендацій Міжнародного енергетичного агентства EYC_{NR} для енергоустановок на ВДЕ має бути більше 2, рекомендоване значення – більше 5.

Річне споживання первинної енергії упродовж сировинного циклу ($E_{\text{сир}}$) описано системою математичних співвідношень, де кожне з рівнянь відповідає за один з елементарних потоків, або за одну з операцій, що мають місце під час підготовки біомаси. Ця система має наступний вигляд:

1. Поживні рештки у вигляді енергетичних тюків:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{сир}} = \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{\text{вал}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{вал}} \cdot Q_{\text{P}}^{\text{H}}; \\ E_{\text{тюк}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{тюк}} \cdot Q_{\text{P}}^{\text{H}}; \\ E_{\text{зб}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{зб}} \cdot Q_{\text{P}}^{\text{H}}; \\ E_{\text{ван1}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{ван1}} \cdot Q_{\text{P}}^{\text{H}}; \\ E_{\text{тр1}} = V \cdot E_{\text{т-км1}} \cdot n_1; \\ E_{\text{збер1}} = V \cdot e_{\text{а.в.}}; \\ E_{\text{тр2}} = V \cdot E_{\text{т-км2}} \cdot n_2; \\ E_{\text{ван2}} = 2,5 \cdot V \cdot b_{\text{ван2}} \cdot Q_{\text{P}}^{\text{H}}; \\ E_{\text{збер2}} = \frac{16,8 \cdot V \cdot e_{\text{збер.нав.}}}{\tau}; \\ E_{\text{под}} = 3 \cdot e_{\text{под}} \cdot V. \end{array} \right. \quad (5)$$

де $E_{\text{вал}}$, $E_{\text{тюк}}$, $E_{\text{зб}}$, $E_{\text{ван1}}$, $E_{\text{тр1}}$, $E_{\text{збер1}}$, $E_{\text{тр2}}$, $E_{\text{ван2}}$, $E_{\text{збер2}}$, $E_{\text{под}}$ – споживання первинної енергії при: валкуванні кукурудзиння на полі; тюкуванні кукурудзиння; під час збору тюків з поля; їх завантаження на транспортний засіб; транспортуванні тюків на центральний склад; зберіганні тюків на центральному складі під агроволокном; транспортуванні тюків до споживача; операціях з вантаження тюків на центральному складі та складі котельної; зберіганні тижневого запасу тюків на складі котельної; подрібненні тюків перед подачею в котел, ГДж/рік;

V – річне споживання палива котельною установкою, т/рік; $b_{\text{вал}}$, $b_{\text{тюк}}$, $b_{\text{зб}}$, $b_{\text{ван}}$ – питомі витрати палива при валкуванні, тюкуванні, зборі та навантаженні сировини, л/т; Q_{P}^{H} – нижча теплотворна здатність дизельного пального, МДж/л; n_1 – відстань транспортування тюків від місця їх виготовлення до центрального складу, км; n_2 – від

центрально складу до котельної, км; τ – навантаження енергетичної установки, год/рік; $E_{т-км}$ – енергоємність транспортної роботи, МДж/т·км; $e_{а.в.}$ – питомі витрати первинної енергії при виробництві агроволокна, МДж/т; $e_{збер.нав.}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві складу, МДж/т; $e_{под}$ – питомі витрати електроенергії на подрібнення тюків, МДж/т.

2. Поживні рештки кукурудзи у вигляді гранул або брикетів:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{сир} = \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{вал} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{вал} \cdot Q_H^p; \\ E_{тюз} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{тюз} \cdot Q_H^p; \\ E_{зб} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{зб} \cdot Q_H^p; \\ E_{ван1} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{ван1} \cdot Q_H^p; \\ E_{тр1} = V_{гр/бр} \cdot E_{т-км1} \cdot n_1; \\ E_{збер1} = 1,2 \cdot V_{гр/бр} \cdot e_{а.в.}; \\ E_{ван2} = 3 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{ван2} \cdot Q_H^p; \\ E_{гр/бр} = 3 \cdot V_{гр} \cdot e_{гр/бр}; \\ E_{тр2} = V_{гр/бр} \cdot E_{ткм2} \cdot n_2; \\ E_{збер2} = \frac{72 \cdot V_{гр/бр} \cdot e_{збер2}}{\tau}. \end{array} \right. \quad (6)$$

де $V_{гр/бр}$ – річне споживання гранул/брикетів котельною установкою, т/рік; n_1 – відстань транспортування тюків з кукурудзиння від місця їх збору до місця гранулювання/брикетування, км; n_2 – відстань транспортування біопалива до споживача, км; $e_{збер2}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві бункеру для гранул/складу для брикетів (термін експлуатації споруди 10 років), МДж/т_{гр/бр}; $e_{гр/бр}$ – питомі витрати первинної невідновлюваної енергії на гранулювання/брикетування (витрати електроенергії в технологічному обладнанні), МДж_{пер}/т_{гр/бр}.

Сукупні витрати первинної енергії у підсистемі перетворення визначаються за залежністю:

$$E_{пер} = E_{к/кн} + E_{екс.} + E_{ел.}, \quad [ГДж/рік] \quad (7)$$

де $E_{к}$ – затрати первинної енергії та стадії спорудження та демонтажу установки, ГДж; $кн$ – розрахунковий період експлуатації обладнання, років; $E_{екс.}$ – витрати первинної енергії на ремонт та обслуговування котельного обладнання, ГДж/рік; $E_{ел.}$ – власне енергоспоживання, ГДж/рік.

Математична модель визначення енергетичної ефективності з врахуванням критеріїв сталого розвитку описується сукупністю співвідношень (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} CED_{NR} = E_{сир} + E_{пер}; \\ E_{сир} = V \cdot \sum_{i=0}^n E_i; \\ E_{пер} = E_{екс.} + E_{ел.} + кн \cdot E_{к}; \\ CEP = \sum W_i \cdot \tau_i; \\ ced_{NR} = \frac{CED_{NR}}{CEP}; \\ EYC_{NR} = \frac{CEP}{CED_{NR}}; \\ ced_{NR} < 0,2, EYC_{NR} > 5. \end{array} \right. \quad (8)$$

На основі отриманої математичної моделі та з використанням сукупності рівнянь (5, 6) було проведено дослідження енергетичної ефективності виробництва теплової енергії у котлі потужністю 500 кВт з використанням у якості палива тюків, гранул та брикетів з поживних решток кукурудзи.

Отримані значення коефіцієнту перетворення невідновлюваної енергії (Табл.3) при відстані транспортування готового біопалива до 150 км відповідають рекомендованому діапазону значень, та знаходяться в межах 4,62-12,71.

Табл. 3. Енергетична ефективність життєвого циклу виробництва теплової енергії з біопалива

Показники енергетичної ефективності	Відстань транспортування, км														
	0	10	50	100	150	0	10	50	100	150	0	10	50	100	150
Тюки з пожнивних решток кукурудзи					Гранули з ПП кукурудзи					Брикети з ПП кукурудзи					
CED, ГДж/рік	6810	6838	6948	7086	7224	7732	7753	7838	7943	8049	7821	7842	7927	8138	8244
ced	1,33	1,34	1,36	1,39	1,41	1,51	1,52	1,53	1,55	1,57	1,53	1,53	1,55	1,57	1,59
$EUC=1/ced$	0,75	0,75	0,74	0,72	0,71	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63
CE _{NR} , ГДж/рік	402	430	540	678	816	790	811	896	1002	1107	716	737	822	927	1033
ced _{NR}	0,08	0,08	0,11	0,13	0,16	0,16	0,16	0,18	0,20	0,22	0,14	0,14	0,16	0,18	0,20
$EUC_{NR}=1/ced_{NR}$	12,71	11,89	9,47	7,54	5,36	6,47	6,30	5,71	5,11	4,62	7,14	6,94	6,22	5,51	4,95

Як видно з залежності, представленої на Рис. 2, коефіцієнт перетворення енергії EUC_{NR} вище для перевезення у вигляді тюків, ніж у вигляді гранул і брикетів, до відстані 500 км.

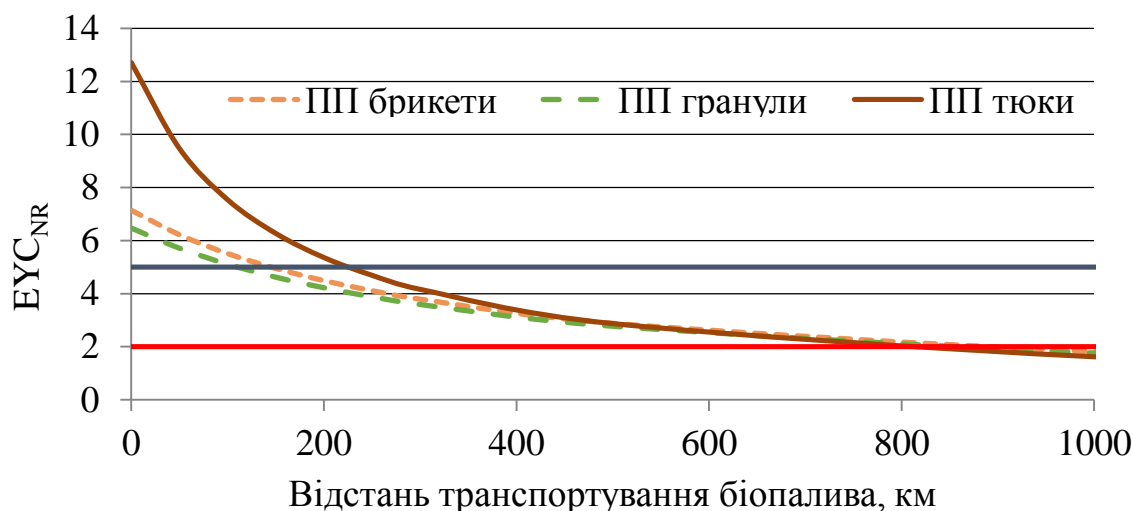


Рис. 2. Залежність коефіцієнту перетворення енергії EUC_{NR} від відстані перевезення біопалива з пожнивних решток кукурудзи.

При необхідності транспортування пожнивних решток на відстань більше ніж 500 км, гранули стають вигіднішими з точки зору енергетичної ефективності. В порівнянні з гранулами, брикети завжди мають кращі показники енергетичної ефективності, як в межах допустимих ($EUC_{NR}=2$), так і рекомендованих значень ($EUC_{NR}=5$).

На Рис. 3 наведено порівняння питомих викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з пожнивних решток кукурудзи у вигляді великих тюків, гранул та брикетів. Видно, що на етапі перевезення гранульованої та брикетованої біомаси відбуваються дещо нижчі викиди парникових газів у порівнянні з перевезенням тюків.

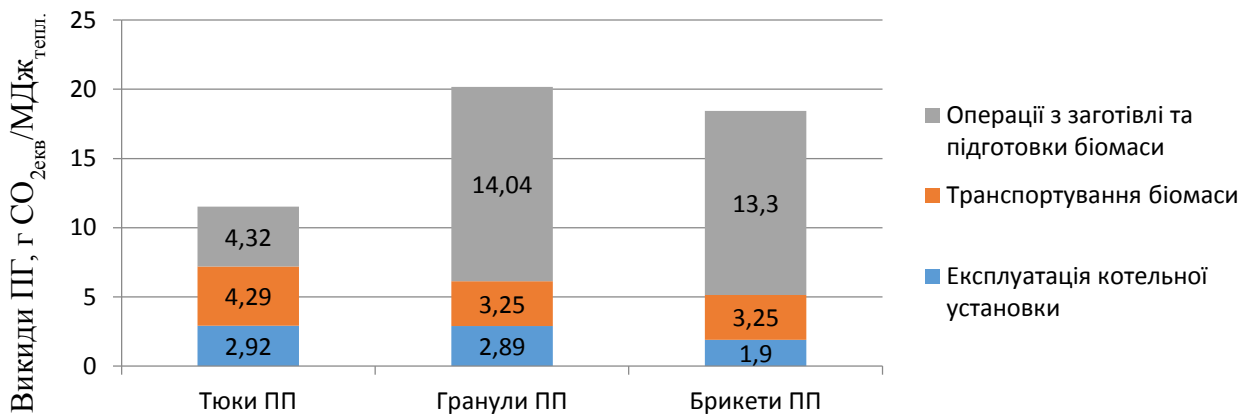


Рис. 3. Питомі викиди парникових газів протягом життєвого циклу при виробництві теплової енергії з ПП кукурудзи (транспортування на 100 км)

Виробництво теплової енергії з твердого біопалива в котлі потужністю 500 кВт забезпечує значне скорочення викидів парникових газів при використанні біопалива з поживних решток кукурудзи у вигляді тюків на 83%-91%; гранул на 73-79%; брикетів на 75-81% в залежності від відстані транспортування біопалива (Табл. 4).

Табл. 4. Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з поживних решток кукурудзи.

Вид біопалива	Скорочення викидів ПГ, %			
	Відстань транспортування, км			
	0	50	100	150
Тюки	90,95	88,27	85,60	82,92
Гранули	79,32	77,34	75,36	73,37
Брикети	81,00	78,97	76,94	74,91

Проаналізовано можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України. Близько 180 МВт_е потужностей на біомасі та біогазі вже працюють в енергосистемі України (квітень 2020 р). До 2035 р. ця цифра може зрости до 1,7 ГВт_е. Частково ця потужність може бути задіяна для балансування енергосистеми, відповідно зменшуючи потребу у будівництві нових балансуєчих газових блоків та неефективне спалювання вугілля в режимах набору-спаду потужності на вугільних електростанціях.

Для ефективної роботи на ринку пікових електричних навантажень існуюча ТЕЦ на біомасі повинна бути дооснащена додатковим котлом для можливості відпуску більшої кількості теплової енергії в години пікового споживання електричної енергії. Як одне з можливих рішень щодо стимулювання роботи ТЕЦ/ТЕС на біомасі та біогазі на ринку балансуєчих потужностей запропоновано підвищений тариф на електроенергію в окремі години доби (ранковий та вечірній піки). При цьому, додаткове стимулювання роботи ТЕЦ у балансуєчому режимі має покривати всі додаткові витрати у порівнянні з режимом роботи ТЕЦ у базовому режимі. Для детальної оцінки обох альтернатив розглянуто типову ТЕЦ на біомасі 3 МВт_е + 20 МВт_т (Рис. 4). Така

«базова» ТЕЦ включає котел на біомасі 30 МВт_T та теплофікаційну турбіну з електричною потужністю 3 МВт_e з відбором тепла до 10 МВт_T . Корисний відпуск тепла складає 20 МВт_T , включаючи 10 МВт_T з відбору турбіни і 10 МВт_T напряму з котла. В базовому режимі ТЕЦ виробляє $3 \text{ МВт}_e + 20 \text{ МВт}_T$ протягом 24 годин/добу.

В балансуєчому режимі турбіна працює як конденсаційна, тобто без відбору пари, з електричною потужністю 6 МВт_e . Необхідна теплова потужність 20 МВт_T забезпечується при цьому від базового і додатково включеного котлів. ТЕЦ виробляє 6 МВт_e в «піку» протягом тільки 6 годин/добу, а теплову енергію відпускає за таким самим графіком, що і базова ТЕЦ – 20 МВт_T протягом 24 годин/добу.

Розраховано, що для створення умов стимулювання інвестора у ТЕЦ на біомасі працювати на ринку пікових електричних навантажень (IRR на рівні 20%), необхідно встановити тариф на обсяг електроенергії, вироблений в періоди пікового споживання, на рівні $0,273\text{-}0,279 \text{ євро/кВт}\cdot\text{год}$ в залежності від схеми відпуску електроенергії в мережу.

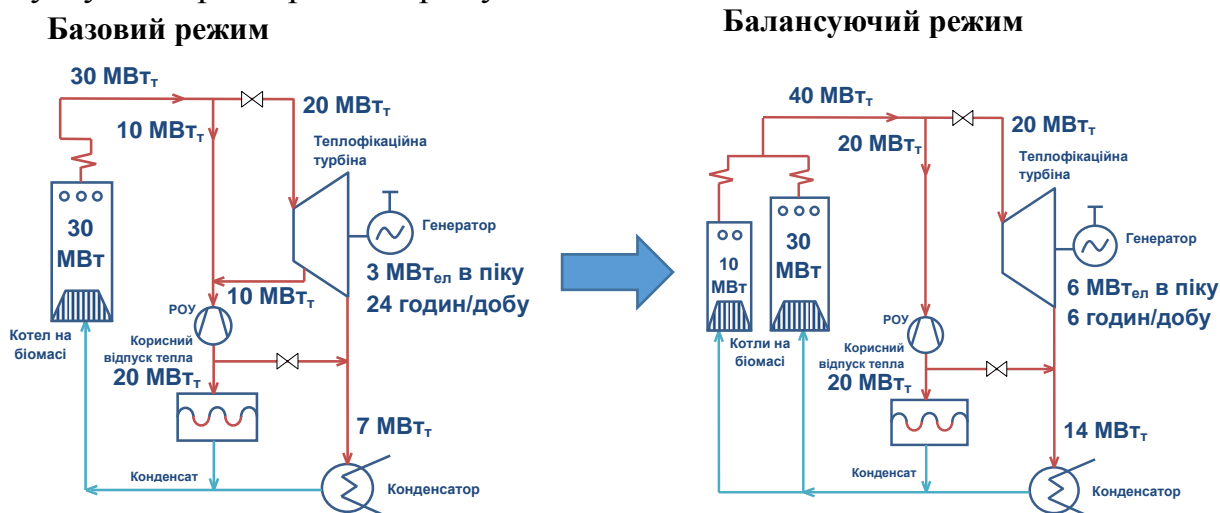


Рис. 4. Концепція роботи ТЕЦ на біомасі у базовому ($3 \text{ МВт}_e + 20 \text{ МВт}_T$) та у балансуєчому ($6 \text{ МВт}_e + 20 \text{ МВт}_T$) режимах.

Для ефективної роботи на ринку пікових електричних навантажень ТЕЦ на біогазі повинна бути дооснащена додатковим газгольдером і електрогенеруючими потужностями. В основу розрахунку міні-ТЕЦ з базовою (номіальною) встановленою електричною потужністю 2126 кВт покладено функціональну модель роботи, коли номінальний об'єм біогазу виділяється рівномірно протягом доби, а спалюється в міні-ТЕЦ у встановлені години. Розглянуто наступні режими роботи міні-ТЕЦ на біогазі:

1. Базовий режим, при якому спалювання біогазу в міні-ТЕЦ проходить синхронно з його утворенням протягом доби (Рис. 5.а). Робота на номінальній потужності 2126 кВт – 24/24 годин на добу.

2. Режим роботи міні-ТЕЦ лише в години пікового навантаження в мережі - всього 6 годин на добу (Рис. 5.б). При цьому, потужність міні-ТЕЦ є вищою за номінальну потужність на деяку величину додаткової пікової потужності $N_{\text{пик}}$.

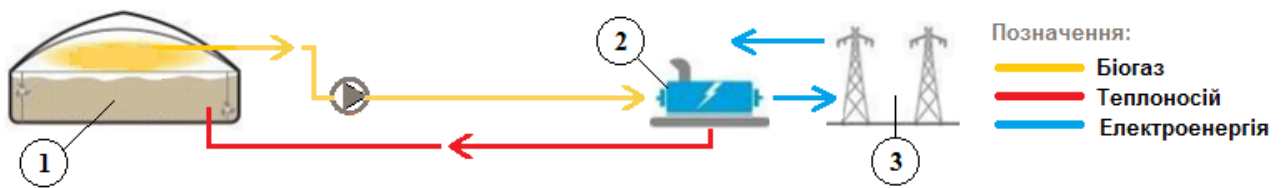


Рис. 5.а. Схема роботи міні-ТЕЦ на біогазі в базовому/піковому режимі 24/0

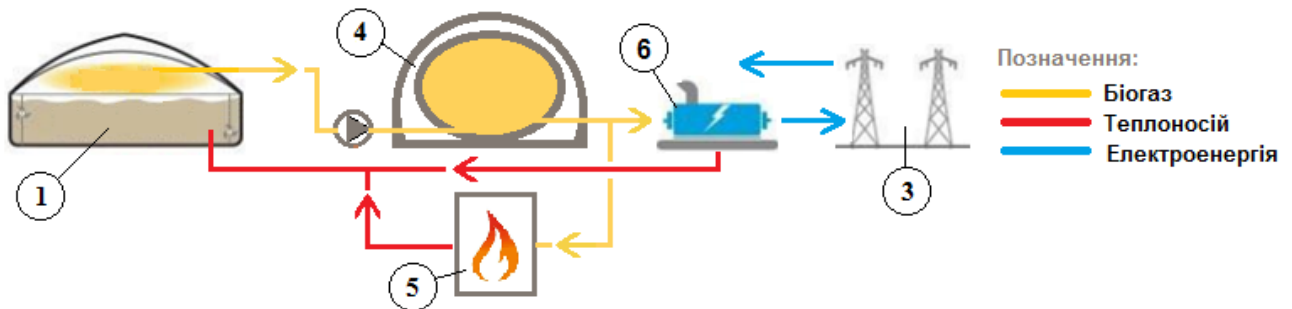


Рис. 5.б. Схема роботи міні-ТЕЦ на біогазі в базовому/піковому режимі 6/6
 Позначення до Рис. 5.а-б: 1 – біореактор, де виробляється біогаз; 2 – міні-ТЕЦ на біогазі номінальної потужності 2126 кВт; 3 – об'єднана електромережа; 4 – додатковий буферний газгольдер; 5 – резервна газова котельня; 6 - міні-ТЕЦ на біогазі сумарною встановленою потужністю 2126 кВт + $N_{\text{пік}}$

Розраховано, що для досягнення балансуєчими моделями проектів IRR 20%, тариф на електричну енергію, вироблену піковими потужностями на біогазі, повинен складати 0,266 євро/кВт·год. Найбільш перспективними для роботи в «пікових» режимах може бути робота КГУ на біометані, для яких необхідний тариф має становити 0,123-0,166 євро/кВт·год.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням технологій спалювання і анаеробного зброджування біологічних видів палива, розробленню та вдосконаленню технологій і обладнання для виробництва з них енергії.

Отримала подальший розвиток технологія спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу. Експериментальні дослідження проведено в експериментальному котлі потужністю 100 кВт (Рис. 6). Проведено серію експериментів з дрібнофракційним деревним паливом вологістю від 12% до 48% при різних способах організації реагування палива і повітря, які реалізовано в ретортах різної конструкції (Рис. 7).

Перший спосіб («класична» реторта) полягав в спалюванні тирси у вигляді насипної гірки палива, що формується безпосередньо над ретортою, з палаючим верхнім шаром (Рис. 7 а). Розподіл повітря був таким: 92% припадало на первинне повітря, яке рівномірно подавалося під шар палива, а 8% становило вторинне повітря, яке подавалося у полум'я над паливом.

Для інтенсифікації спалювання палива в режимі верхнього займання було вирішено максимально утримувати тепло, що виділяється, в спеціально організованій зоні займання – в горловині «глибокої» реторти (Рис. 7 б).



Рис. 6. Стенд для дослідження спалювання деревної тріски

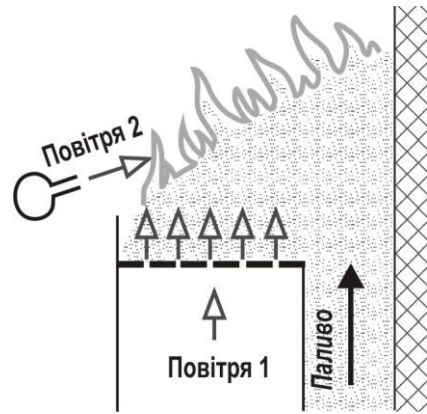


Рис. 7. а) «класична реторта»

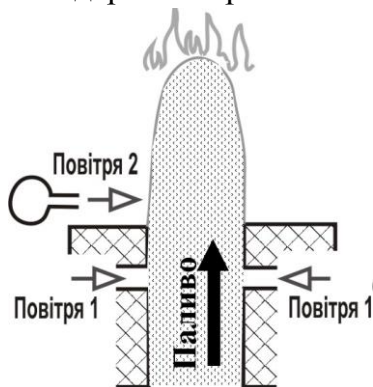


Рис. 7. б) «глибока» реторта

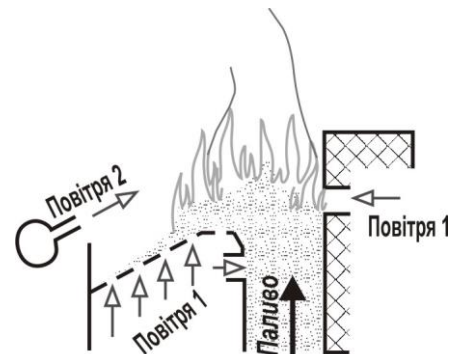
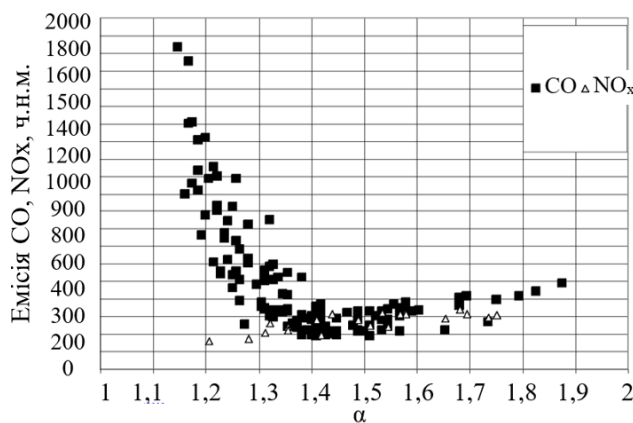


Рис. 7. в) «глибока» реторта з решітками допалювання

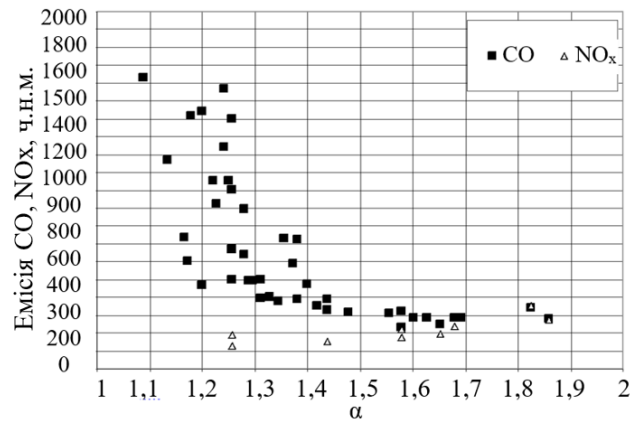
Основна ідея третього типу реторти – «глибокої» реторти з решітками допалювання (Рис. 7 в) – полягає у забезпеченні інтенсивного горіння палива з виштовхуванням великих шматків деревини і негорючих частинок на решітку для їх допалювання та подальшого видалення з топки. Розподіл повітря був таким: через сопла реторти 55-70%, через сопла, розташовані над паливом 10%, решта повітря підводилося знизу колосникової решітки. У такому режимі вдалося досягти найбільшої інтенсивності горіння.

На Рис. 8 представлено дані про емісію CO і NO_x при спалюванні у глибокій реторті для випадку введення всього повітря через сопла реторти.

При збільшенні вологості палива емісія NO_x стає меншою, а емісія CO, навпаки, зростає при однакових коефіцієнтах надлишку повітря (α). Мінімальні емісії CO досягалися при коефіцієнтах надлишку повітря в діапазоні $\alpha=1,4-1,6$. Збільшення α до 1,8-1,9 призводить до помірного зростання CO, тоді як зменшення коефіцієнта надлишку повітря нижче 1,3 призводить до різкого збільшення емісій CO, які при $\alpha=1,15$ можуть перевищувати 2000 ppm. Спостерігалася загальна тенденція зниження емісії NO_x при зменшенні коефіцієнта надлишку повітря, що пов'язано зі зменшенням об'єму повітря, яке бере участь у процесі горіння палива.



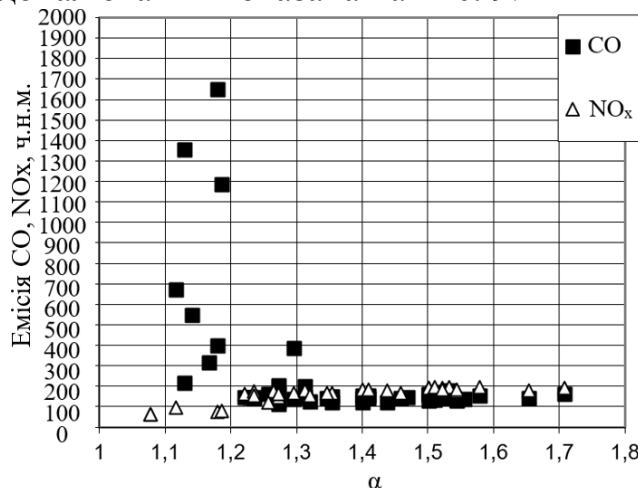
а) деревні відходи середньої вологості ($W=29,3\%$)



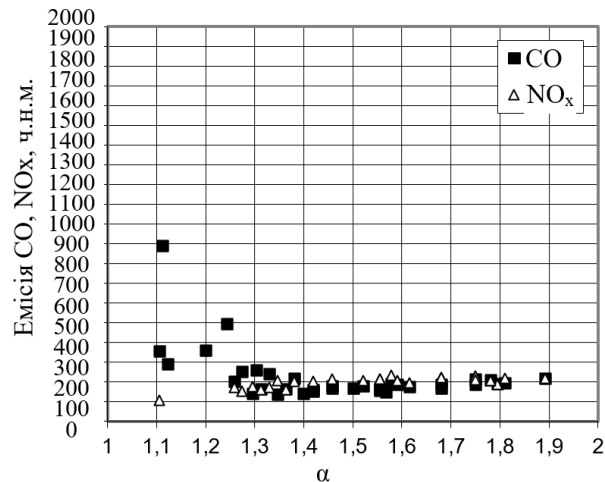
б) деревна тирса високої вологості ($W=45\%$)

Рис. 8. Залежність емісії CO та NO_x від коефіцієнту надлишку повітря при спалюванні деревного палива різної вологості у «глибокій» реторті.

Залежність емісії CO та NO_x від коефіцієнту надлишку повітря при спалюванні деревного палива різної вологості у «глибокій» реторті з решітками допалювання показана на Рис. 9.



а) тирса середньої вологості ($W=31,8\%$)



б) волога тирса ($W=49,5\%$)

Рис. 9. Залежність емісії CO та NO_x від коефіцієнту надлишку повітря при спалюванні деревного палива різної вологості у «глибокій» реторті з решітками допалювання.

Доведено, що «глибока» реторта з решітками допалювання дозволяє досягати високої інтенсивності горіння в широкому діапазоні вологості палива. За результатами проведених досліджень розроблено конструкцію водогрійного деревноспалювального котла потужністю 100 кВт з топковим пристроєм ретортного типу, що дозволяє використовувати деревне паливо з вологістю до 50%, збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази та зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50% в порівнянні з існуючими конструкціями топкових пристроїв. Отримано ККД котла з топковим пристроєм ретортного типу 83,2%.

Отримала подальший розвиток технологія спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії. Розроблено, досліджено та виготовлено

дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів потужністю 100, 250 та 350 кВт (Рис. 10).



Показники	Значення
Теплова потужність, кВт	350
Коефіцієнт корисної дії, %	83
Паливо: тюки соломи прямокутні та круглі, м	1,3x1,3x1,8 до Ø 1,8
Маса одного завантаження, кг	200-250
Час згорання, год.	3
Потреба у біопаливі, т/сезон	380
Заміщення природного газу, тис. м ³ /сезон	171

Рис. 10. Соломоспалювальний котел конструкції ІТТФ НАНУ потужністю 350 кВт встановлений в с. Стави, Київська обл.

Проведено дослідження аеродинамічних умов горіння тюка соломи у набігаючому струмені повітря на експериментальному зразку теплогенератора ТС-350 потужністю 350 кВт, який було змонтовано для опалення приміщень школи в с. Стави Кагарлицького району Київської області (Рис. 11).

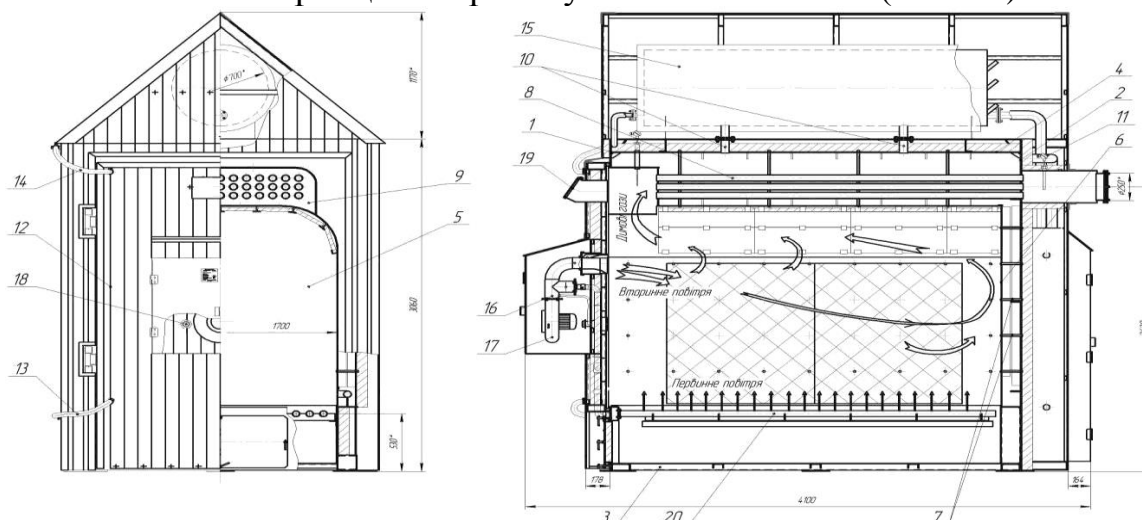
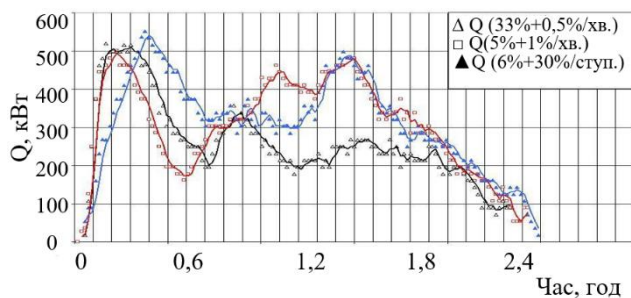


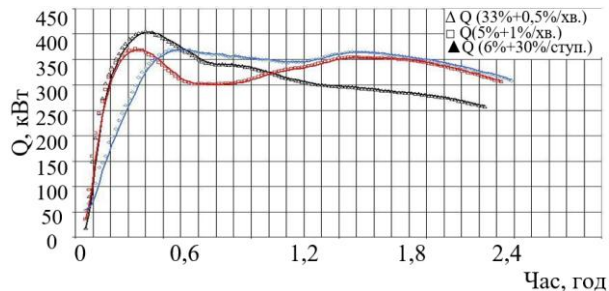
Рис. 11. Теплогенератор ТС-350 жаротрубно-димогарного типу.

Результати опрацювання експериментальних даних і розрахунків поточної теплової потужності котла з різними способами подачі вторинного дуття представлено на Рис. 12 а. З представлених даних видно, що відразу після запалювання тюка при всіх способах спалювання починається підвищення теплової потужності практично від нульового значення до величини, що значно перевищує (більше ніж на 50%) рівень розрахункової потужності.

На Рис. 12 б показана середня теплова потужність котла при різних способах спалювання соломи. Більш стабільна середня теплова потужність теплогенератора забезпечується при швидкому повертанні сопел на 1%/хв. та при ступеневому повертанні сопел.



а)



б)

Рис. 12. Дослідження режимів пошарового спалювання соломи в теплогенераторі 350 кВт із різною швидкістю повертання сопел. а) Поточна теплова потужність; б) Середня теплова потужність: 1) сопло встановлюється на 33% від мінімального значення положення сопла і далі повертається зі швидкістю 0,5%/хв, поки не дійде до максимального значення (кута) положення сопла; 2) сопло встановлюється на 5% від мінімального значення положення сопла і далі повертається зі швидкістю 1%/хв, поки не дійде до максимального значення (кута) положення сопла; 3) сопло встановлюється на 6% від мінімального значення положення сопла і далі повертається тільки тричі на 30% можливої амплітуди повертання сопел.

Емісія СО і твердих часток протягом одного циклу спалювання тюків соломи в теплогенераторі 350 кВт представлена на Рис. 13-14.

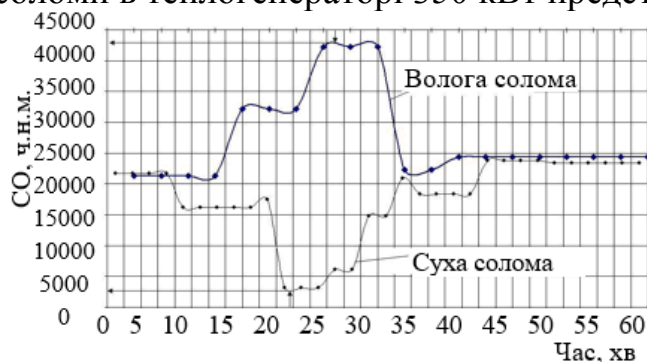


Рис. 13. Емісія СО при спалюванні тюків вологої ($W=30\%$) та сухої ($W=18\%$) соломи.

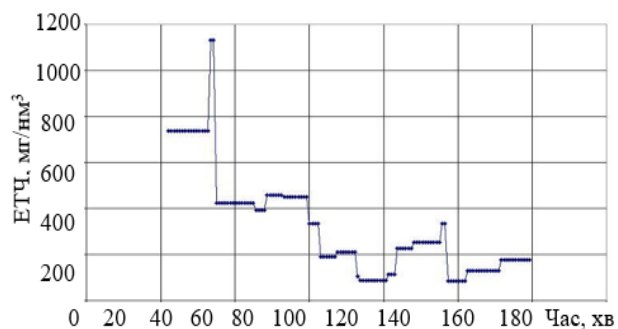


Рис. 14. Емісія твердих часток у теплогенераторі 350 кВт при швидкому повертанні сопел

Таким чином, шляхом експериментального підбору ряду конструктивних та експлуатаційних параметрів, а саме швидкості і кута нахилу сопел дуття та запропонованого швидкого та ступеневого повертання сопел, досягнуто стабільне вигорання та усунення неповноти згорання тюка, забезпечення стабільних показників потужності котла, зменшення емісії СО.

Отримала подальший розвиток технологія спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в склад яких входить завантажувальний пристрій лоткового типу, в якому організовано безперервне стабільне спалювання малих тюків соломи та забезпечено помірні викиди шкідливих речовин. На Рис. 15 показано експериментальний стенд з лотковим топковим пристроєм для дослідження процесів горіння малих тюків соломи.



Показники	Значення
Теплова потужність, кВт	50 - 100
Коефіцієнт корисної дії, %	85
Паливо: тюки соломи прямокутні, м	0,9*0,5*0,4
Маса одного завантаження, кг	12-15

Рис. 15. Загальний вигляд експериментального стенду з лотковим топковим пристроєм.

В ході експериментальних досліджень було виявлено, що після пересування тюка спочатку спостерігався вихід летючих з соломи у вигляді сизих пасм і їх горіння над тюком (Рис. 16 а). Потім на поверхні тюка з'являлися окремі кратери горіння, по яким яскраві язички полум'я підіймалися від колосникової решітки, прорізаючи всю товщу соломи з формуванням окремих каналів діаметром до 40-60 мм.



а) до реконструкції



б) після реконструкції

Рис. 16. Горіння тюка на лотковому топковому пристрої.

На основі цих спостережень зроблене припущення, що для забезпечення стабільнішого та більш рівномірного горіння тюків необхідно: обмежити попадання тюка в зону допалювання; зменшити площу зони горіння для досягнення більш рівномірного пересування тюків; на колосникової решітці у зоні горіння отвори підводу повітря розташувати в одну лінію з кроком не більше 60 мм з тим, щоб утворені повітряними струменями канали горіння зливалися і формували вертикальну поверхню горіння, яка ніби зрізає солому від тюка шар за шаром.

Було виконано реконструкцію топкового пристрою та проведено порівняльні дослідження, які підтвердили, що на реконструйованому пристрої горіння відбувалося зі злиттям окремих факелів і формуванням суцільного фронту горіння (Рис. 16, б). Пересування тюка стало більш рівномірним і горіння стабільнішим.

На основі отриманих експериментальних даних розраховано за балансовим методом ККД котла з дослідженим топковим пристроєм, який склав $\eta = 85,5\%$. Таким чином, при спалюванні малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу з запропонованим завантажувальним пристроєм лоткового типу забезпечено безперервне стабільне спалювання малих тюків соломи та помірні викиди шкідливих речовин.

Отримано нові експериментальні дані про ефективність анаеробного зброджування поживних решток пшениці, кукурудзи та соняшнику, що є науковим підґрунтям для подальшого розвитку технологій виробництва біогазу з агросировини. Зокрема, отримано нові дані про вихід та швидкість виходу CH_4 при періодичному анаеробному зброджуванні соломи пшениці (природної, механічно подрібненої до фракції < 2 мм та у вигляді гранул), стебел кукурудзи (механічно подрібненої до фракції < 2 мм та у вигляді гранул) та лушпиння соняшнику.

Експериментальні дослідження виконано в лабораторії відділу теплофізичних проблем систем теплопостачання Інституту технічної теплофізики НАН України. Дослідна установка виконана у вигляді ряду систем біореакторів періодичної дії. Одиначна система дослідної установки складається з біореактора об'ємом 2 дм^3 та зовнішнього розташованого евдіометра об'ємом $1,6 \text{ дм}^3$ (Рис. 17).

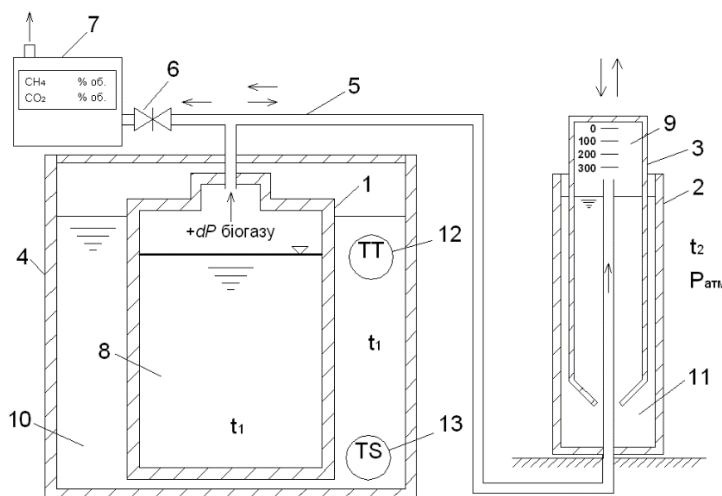


Рис. 17. Принципова схема одиначної системи дослідної установки:

1 - ємність реактора; 2 - нерухома частина евдіометра; 3 - рухома частина евдіометра; 4 - ємність з теплоносієм; 5 - трубка для відведення біогазу; 6 - запірний кран; 7 - газоаналізатор; 8 - робоче середовище реактора; 9 - внутрішній простір евдіометра з біогазом; 10 - теплоносій (вода); 11 - 5% водний розчин NaCl ; 12 - ртутний термометр; 13 - терморегулятор.

За результатами досліджень (Рис. 18) виявлено, що вихід CH_4 зі зразків соломи пшениці, обробленої шляхом екструзії при виробництві гранул, є найбільшим, у порівнянні з іншими дослідженими формами такої соломи, і складає $300\text{-}320 \text{ л}_н \text{ CH}_4/\text{кгСОР}$. При цьому, виявлено, що лише механічне подрібнення не вплинуло на вихід біогазу, втім призвело до збільшення швидкості виходу біогазу з соломи пшениці.

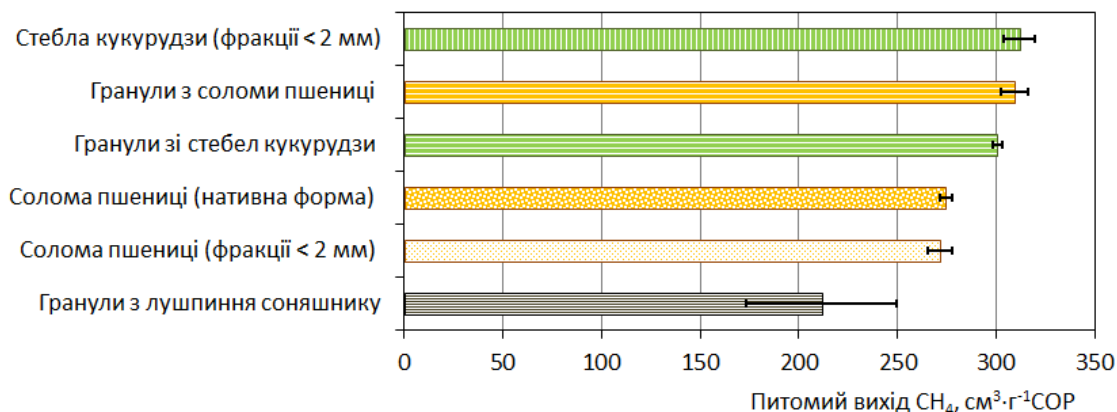


Рис. 18. Питомий вихід CH₄ з поживних решток.

Виявлено також, що стебла кукурудзи мають вихід біогазу на рівні зі зразками соломи пшениці 300-320 л_н.CH₄/кгСОР. При цьому, зразок гранул зі стебел кукурудзи, досліджений на 5-му етапі, показав вихід CH₄ 245-260 л_н.CH₄/кгСОР, що вказує на вплив сорту культури та способу екструзії при виробництві гранул на вихід CH₄.

Вихід CH₄ при зброджуванні гранул з лушпиння соняшнику з використанням дигестату біогазової станції склав 249,8 л_н.CH₄/кгСОР, а при зброджуванні з інокулятом лабораторним – лише 132,6 л_н.CH₄/кгСОР. Це вказує на істотний вплив типу інокуляту на ступінь біодеструкції органічної речовин матеріалу.

Серед досліджених типів найбільш інтенсивний вихід біогазу спостерігався при зброджуванні гранул соломи пшениці та досліджених зразків стебел кукурудзи. Найбільша поточна швидкість виходу CH₄ при зброджуванні гранул з соломи пшениці в середньому становила 0,22 л_н.CH₄/кг·добу, що на 30,4% та 122,4% вище, ніж аналогічний показник при зброджуванні подрібненої та не подрібненої соломи, відповідно.

Встановлено залежності швидкості виходу CH₄ та кінетичних констант від початкової концентрації СОР в реакторі.

Кумулятивна швидкість виходу CH₄ для кожного періоду часу τ визначається наступним рівнянням:

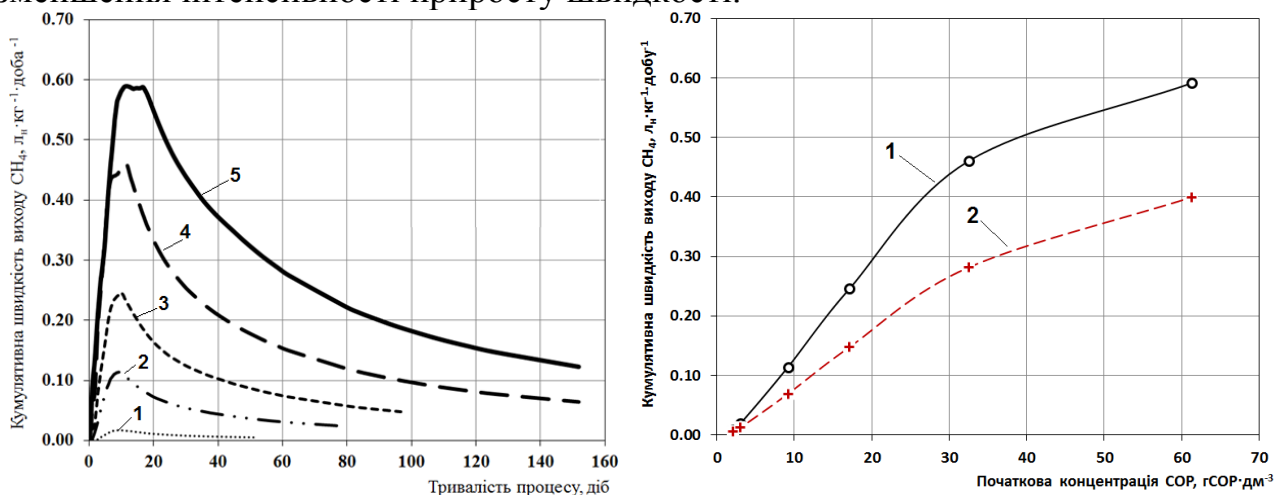
$$q_{bg,j} = \frac{V_{bg,j}}{M_{r,0} \cdot \Delta \tau_j} \quad (9)$$

де $V_{bg,j}$ – накопичений вихід біогазу за проміжок часу $\Delta \tau_j$, л_н; $M_{r,0}$ – внесена маса дослідної суміші, включно з інокулятом, кг; $\Delta \tau_j$ – період часу від внесення дослідної суміші в реактор до моменту фіксації показів виходу біогазу τ_i , діб.

На Рис. 19 показано зміни кумулятивної швидкості виходу біогазу в часі для дослідних сумішей з початковою концентрацією СОР гранул соломи пшениці від 3,1 до 61,3 гСОР/дм³.

Виявлено, що при збільшенні концентрації СОР збільшувалось значення найбільшої досягнутої кумулятивної швидкості виходу CH₄, але при цьому також збільшувався період часу від початку процесу бродіння до досягнення

такого значення. Найбільше значення кумулятивної швидкості $0,59 \text{ л}_\text{н}\text{СН}_4/\text{кг}\cdot\text{добу}$ було встановлено при зброджуванні дослідної суміші з гранулами соломи пшениці при стартовій концентрації СОР в реакторі $61,3 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$ за період 12-13 діб. При цьому найбільше досягнуте значення поточної швидкості виходу СН_4 між двома послідовними замірами виходу біогазу склало $1,05 \text{ л}_\text{н}\text{СН}_4/\text{кг}\cdot\text{добу}$. Значення найбільшої досягнутої швидкості виходу СН_4 змінюється лінійно до концентрації $27\text{-}30 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$, а подальше збільшення концентрації СОР веде до зміни лінійного характеру залежності в сторону зменшення інтенсивності приросту швидкості.



а) зміна кумулятивної швидкості виходу СН_4 в часі при початковій концентрації СОР : 1 – $3,09 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$; 2 – $9,19 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$; 3 – $17,16 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$; 4 – $32,54 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$; 5 – $61,30 \text{ гСОР}/\text{дм}^3$

б) зміна кумулятивної швидкості виходу СН_4 в залежності від початкової концентрації СОР : 1 – максимального значення швидкості; 2 – усередненого значення швидкості

Рис. 19. Залежність кумулятивної швидкості виходу СН_4 від тривалості процесу і початкової концентрації СОР гранул соломи пшениці в реакторах періодичної дії при температурі $36 \pm 1^\circ\text{C}$.

На основі результатів вимірювання виходу біогазу та СН_4 у часі, з використанням регресійного аналізу методом узагальненого приведенного градієнту, було також оцінено значення кінетичних констант k для моделі розпаду 1-го порядку та R_{max} для моделі Гомпертца в залежності від початкової концентрації СОР гранул соломи пшениці.

Модель розпаду 1-го порядку використано у виді рівняння 10:

$$P_{(t)} = P_T \cdot (1 - \exp^{-k \cdot (t - T_{LAG})}), \quad (10)$$

а функцію Гомпертца - у виді рівняння 11:

$$P_{(t)} = P_T \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{MAX} \times e}{P_T} (T_{LAG} - t) + 1 \right] \right\} \quad (11)$$

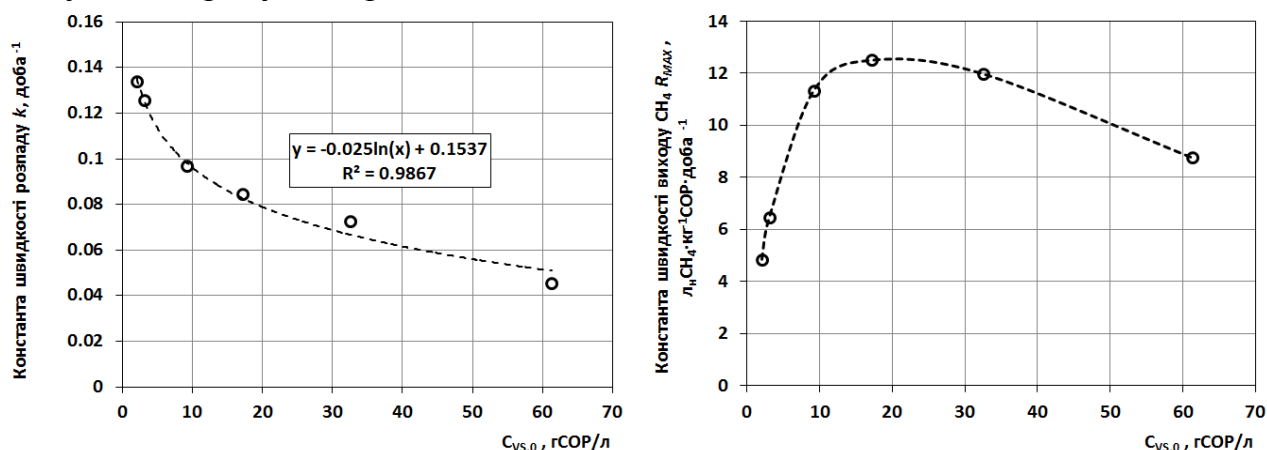
де $P_{(t)}$ – питомий накопичений вихід СН_4 за період часу $\Delta \tau_j$, $\text{л}_\text{н}\text{СН}_4/\text{кгСОР}$; k – константа швидкості розпаду 1-го порядку, доба^{-1} ; P_T – граничний питомий накопичений вихід СН_4 , $\text{л}_\text{н}\text{СН}_4/\text{кгСОР}$; T_{LAG} – тривалість лаг-фази процесу, діб;

R_{MAX} – максимальна швидкість виходу CH_4 , $л_нCH_4/кгСОР \cdot добу$, e – фундаментальна математична константа, $e=2.71828$.

Виявлено залежність величини константи швидкості розпаду 1-го порядку k від початкової концентрації $СОР$ гранул соломи в реакторі в діапазоні 3,1-61,3 $гСОР/дм^3$ (Рис. 20 а), яку можна описати логарифмічним рівнянням виду

$k=a \cdot \ln(C_{VS,0})+b$, де: $C_{VS,0}$ – початкова концентрація $СОР$ в реакторі, $гСОР/дм^3$; a та b – коефіцієнти рівняння, значення яких дорівнює $-0,025$ та $0,1537$, відповідно. Коефіцієнт детермінації виявленої залежності R^2 склав $0,9867$.

Характер залежності величини константи R_{MAX} від початкової концентрації $СОР$ (Рис. 20 б) виявився відмінним від характеру залежності константи швидкості розпаду 1-го порядку k від початкової концентрації $СОР$. При збільшенні $C_{VS,0}$ з $2,06$ до $17,16$ $гСОР/дм^3$, величина константи R_{MAX} спочатку збільшилась з $4,85$ до $12,50$ $л_нCH_4/кгСОР \cdot добу$, а при подальшому збільшенні $C_{VS,0}$ до $61,30$ $гСОР/дм^3$ – зменшилась до $8,75$ $л_нCH_4/кгСОР \cdot добу$. Характер такої залежності є подібним до характеру залежності в моделі Моно, з урахуванням інгібування продуктом реакції.



а) константа швидкості розпаду 1-го порядку k

б) константа швидкості виходу CH_4 R_{MAX}

Рис. 20. Залежність кінетичних констант швидкості виходу CH_4 від початкової концентрації $СОР$ гранул соломи пшениці в реакторах періодичної дії при температурі $36 \pm 1^\circ C$.

Таким чином, отримані дані вказують на те, що поживні рештки основних сільськогосподарських культур в Україні є цінним ресурсом з потенціалом виробництва $200-470$ $м^3/т$ біогазу з вмістом CH_4 на рівні $57-65\%$, в залежності від культури та способу попередньої підготовки. Попередня обробка поживних решток методами екструзії при виробництві гранул є доцільною як з точки зору збільшення виходу біогазу, так і з точки зору збільшення швидкості виходу біогазу.

П'ятий розділ присвячено ТЕО технологій виробництва енергії з біологічних видів палива. Вдосконалено методичні засади фінансового аналізу інвестиційних проєктів, які адаптовано для застосування у біоенергетичних проєктах. Застосовано підхід, який базується на оцінці виходу сухої маси

побічної продукції кукурудзи на зерно з одиниці площі за трьома сценаріями: мінімальним – 2,5 т с.р./га, середнім – 3,5 т с.р./га та максимальним 5,0 т с.р./га. Техніко-економічна оцінка заготівлі, транспортування, зберігання ПП кукурудзи та її переробки у гранули і брикети проведена на суху масу, що дозволяє з огляду на широкий діапазон вологості цільової біомаси під час збирання отримати більш коректні результати. Вперше розроблену методику застосовано для ТЕО наступних нових та перспективних для України технологій: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування ПП АПК; виробництва і використання біометану. Результати ТЕО заготівлі ПП кукурудзи на базі прес-підбирача великих прямокутних тюків для урожайності 2,5; 3,5 та 5 т с.р./га наведено у Табл. 5.

Табл. 5. ТЕО заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках.

Показники	Вихід ПП кукурудзи		
	2,5 т с.р./га	3,5 т с.р./га	5 т с.р./га
Обсяги заготівлі біомаси, т с.р./рік	3920	4802	5880
Капітальні витрати, тис. євро	261,7	269,6	279,3
Операційні витрати, тис. євро/рік	80,5	90,7	103,3
Вартість ПП кукурудзи у полі*, євро/т с.р.	8,0		
Повна собівартість тюків, євро/т с.р.	27,2	24,5	22,3
Продажна ціна тюків біомаси**, євро/т с.р. з ПДВ	40		
Простий термін окупності, років	6,4	4,8	3,7
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	12,3	22,5	35,1

* Вартість ПП кукурудзи визначається за вартістю еквівалентних доз мінеральних добрив для заміни поживних елементів у біомасі.

** Відповідає ціні тюків біомаси 25 євро/т без ПДВ для ПП кукурудзи вологістю $W=25\%$.
с.р. – суха речовина

Виконано ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи для продуктивності лінії брикетування 0,5; 2 і 4 т/год. Для проекту з продуктивністю 2 т/год простий термін окупності складає 3,7 років, IRR - 34,7%. Виконано ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи для продуктивності лінії гранулювання 2; 4 і 10 т/год. Для проекту з продуктивністю 4 т/год простий термін окупності складає 4,4 роки, IRR - 26,1%. Виконано ТЕО анаеробного зброджування ПП АПК. Отримано простий термін окупності: 4,6 – 6,5 років, IRR: 14,2 – 20%.

На Рис. 21 представлено результати оцінки необхідної величини «зеленого» тарифу на електричну енергію з біометану для розглянутих вище сценаріїв, у співставленні з діючим «зеленим» тарифом на біогаз 0,124 євро/кВт·год.



Тариф на електричну енергію, євро-центів/кВт·год, без ПДВ

Рис. 21. Необхідні величини тарифу на електричну енергію, вироблену з біометану.

Повна собівартість товарного біометану, з урахуванням виду сировини, потужності установки та вартості логістики, може складати 313-1136 євро/1000 м³. Для інвестиційної привабливості виробництва стисненого біометану для застосування в якості моторного палива з IRR на рівні 20% його ринкова ціна повинна складати принаймні 570 - 770 євро/1000 м³. Необхідними передумовами використання біометану є створення національного реєстру біометану.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у недостатності існуючих закономірностей та наукових результатів для подальшого підвищення ефективності виробництва енергії з біологічних видів палива, для оцінки реального енергетичного потенціалу біомаси в Україні, для дослідження процесів заготівлі біомаси, її перетворення у тверде біопаливо, процесів спалювання та анаеробного зброджування біомаси та їх екологічного впливу на довкілля. Найбільш вагомими науковими та практичними результатами роботи є такі:

1. Науково обґрунтовано методичні засади оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, які охоплюють оцінку теоретичного, технічно досяжного та економічно доцільного потенціалу біомаси. Включено уточнені частки ПП с-г культур та цілий ряд нових складових (сухостій, деревні відходи від реконструкції захисних лісосмуг, відходи обрізки та викорчовування багаторічних сільськогосподарських насаджень, біогаз з лігноцелюлозних відходів та ПП АПК, біогаз зі стічних вод). Економічно доцільний енергетичний потенціал біомаси України в 2018 р. склав 23,1 млн т н.е./рік, а в 2050 р. складе 45 млн т н.е./рік.

2. Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р. Передбачається, що загальна встановлена потужність біоенергетичного обладнання у 2050 році складатиме близько 34 ГВт_т і 5,5 ГВт_{ел}, загальне споживання біопалив – 23 млн т н.е./рік, заміщення природного газу – 24 млрд м³/рік, створення робочих місць – до 160 тис.

3. На основі виконаного аналізу показано перспективність використання ПП кукурудзи як палива, що має досить хороші паливні характеристики. Проаналізовано чотири технології заготівлі ПП кукурудзи. З огляду на енерго- та ресурсоефективність, можливість використання для збирання ПП кукурудзи на зерно наявної у агровиробників техніки, зменшення контакту біомаси із ґрунтом та мінімізацію економічних витрат на заготівлю, для України рекомендовано трьохпрохідну систему заготівлі ПП кукурудзи у великих прямокутних тюках.

4. За методологією оцінки життєвого циклу виконано аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. Використання великих тюків ПП кукурудзи при відстані транспортування сировини до 50 км забезпечує зниження споживання первинної енергії

викопного палива у 10 та більше разів, а використання гранул та брикетів - у понад 5 разів. Скорочення викидів парникових газів при використанні пожнивних решток у тюках в якості палива становить 83-91%; у гранулах 73-79%; у брикетах 75-81% за умови транспортування біомаси на відстані до 150 км.

5. Аналіз можливостей застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України показав, що для ефективної роботи на ринку пікових електричних навантажень ТЕЦ на біомасі повинні бути дооснащені додатковими котлами, а необхідний тариф в години пік має становити 0,273-0,279 євро/кВт·год. БГУ повинна бути дооснащена додатковими електрогенеруючими потужностями та резервним газгольдером, а необхідний тариф має становити 0,266 євро/кВт·год. Найбільш перспективними для роботи в «пікових» режимах може бути робота КГУ на біометані, для яких необхідний тариф має становити 0,123-0,166 євро/кВт·год.

6. Вдосконалено технологію спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, що дозволяє використовувати деревне паливо з вологістю до 50%. Розроблена технологія дає можливість збільшити інтенсивність горіння в 3-4 рази та зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50%. Розроблений котел забезпечує ККД на рівні 83,2%.

7. Розроблено, виготовлено та експериментально досліджено дослідно-промислові зразки соломоспалювальних котлів періодичної дії потужністю 100, 250 та 350 кВт. Шляхом експериментального підбору ряду конструктивних та експлуатаційних параметрів, а саме швидкості і кута нахилу сопел дуття та запропонованого швидкого та ступеневого повертання сопел, досягнуто стабільне вигорання тюка, забезпечення стабільних показників потужності котла, зменшення емісії CO. Розроблений котел забезпечує середній ККД на рівні 76-78%.

8. Розроблено та експериментально досліджено оригінальну конструкцію топкового пристрою для безперервного спалювання малих тюків соломи потужністю до 100 кВт, в якому забезпечується стабільне горіння, постійність температури теплоносія на виході з котла разом з помірними викидами шкідливих речовин (CO – 2450 ppm). Розрахований за балансовим методом ККД котла становить 85,5%.

9. Експериментально підтверджено, що пожнивні рештки с-г культур є придатними для виробництва з них біогазу шляхом метанової ферментації. Вихід біогазу/метану залежить від виду культури, з якої отримано пожнивні рештки, а також від способу їх попередньої підготовки. Попередня підготовка пожнивних решток методом екструзії при виробництві гранул дозволяє збільшити вихід біогазу/метану. Концентрація органічної речовини пожнивних решток в біореакторі впливає на питому швидкість виходу біогазу/метану з одиниці робочого об'єму, а вказана залежність визначається запропонованим логарифмічним рівнянням. Процес метанової ферментації в періодичному режимі при температурі $36 \pm 1^{\circ}\text{C}$ не інгібується при доведенні стартової концентрації COP пожнивних решток пшениці в реакторі до 61,3 г COP/кг.

10. Адаптовано для застосування у біоенергетичних проєктах методичні засади фінансового аналізу інвестиційних проєктів, де розрахунки виконуються для сухої маси, що робить методику більш універсальною і дозволяє отримати більш коректні результати.

- З використанням запропонованої методики виконано ТЕО чотирьох технологій збору ПП кукурудзи. З них найбільш ефективним є збір ПП у великих прямокутних тюках (простий термін окупності – 4,8 років, IRR – 22,5%).
- Виконано ТЕО виробництва брикетів з ПП кукурудзи для продуктивності лінії брикетування 0,5; 2 і 4 т/год. Для проєкту з продуктивністю 2 т/год простий термін окупності складає 3,7 років, IRR – 34,7%.
- Виконано ТЕО виробництва гранул з ПП кукурудзи для продуктивності лінії гранулювання 2; 4 і 10 т/год. Для проєкту з продуктивністю 4 т/год простий термін окупності складає 4,4 роки, IRR - 26,1%.
- Виконано ТЕО анаеробного зброджування ПП АПК. Отримано простий термін окупності: 4,6 – 6,5 років, IRR: 14,2 – 20%.
- Виконано ТЕО виробництва і використання біометану. Включення існуючих КГУ в проєкт когенерації на біометані може відбуватися за величини «зеленого» тарифу в базовому режимі на рівні 0,111-0,154 євро/кВт·год, а при роботі в піковому режимі – 0,123-0,166 євро/кВт·год.

11. Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема на котлобудівельному заводі ТОВ «Волинь-Кальвіс», у ТОВ «Котлозавод «Крігер», у ПрАТ «МХП Еко Енерджи», у навчальному процесі Національного університету біоресурсів і природокористування України, в Держенергоефективності та комітеті ПЕК і ЖКГ Верховної Ради України.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк, К.В. Дмитрук, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Забарний, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, А.А. Сибірний, С.П.Циганков Київ: «Аграр Медіа Груп», 2010. 408 с.

2. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк, В.О.Дубровін, А.І.Ємець, Г.М.Забарний, Г.М.Калетнік, М.Д.Мельничук, В.Г.Мироненко, Д.Б.Рахметов, С.П.Циганков. Київ: «Аграр Медіа Груп», 2010. 326 с.

3. G. Geletukha, C. Khawaja, R. Janssen, D. Rutz and others. Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe // Proceedings of 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal. p. 1921 – 1924, DOI: 10.5071/27thEUBCE2019-ICO.12.3. ISSN 2282-5819. Індексуються у Scopus.

4. Geletukha G., Mergner R., Janssen R, Rutz D. and others. Fostering sustainable feedstock production for advanced biofuels on underutilized land in Europe // Proceedings of

25th European Biomass Conference and Exhibition, 12-15 June 2017, Stockholm, Sweden, p. 125-130. DOI: 10.5071/25thEUBCE2017-1CO.5.5. ISSN 2282-5819. Індекс. у Scopus.

5. Slenkin M., Geletukha G. Development of ecologically friendly technology for gasification of municipal solid wastes // In: Sheffield J.W., Sheffield Ç. (eds) Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2007. p. 243-247. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6442-5_20 Індексуються у Scopus.

6. Geletukha G.G., Martsenyuk Z.A. Energy potential of biomass in Ukraine // Heat Transfer Research: Volume 29 № 6 (1998), с 433-437 (ISSN: 1064-2285) DOI: [10.1615/heattransres.v29.i6-8.100](https://doi.org/10.1615/heattransres.v29.i6-8.100) Індексуються у Scopus.

7. Aznar M.R., Borisov I.I., Geletukha G.G., Corella J., Khalatov A.A. and others. Producer gas cleaning from tars in a vortex bubbling device // Heat Transfer Research: Volume 30 № 1 (1999), с 50-58 (ISSN: 1064-2285). Індексуються у Scopus.

8. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Geletukha G.G. Water boiling at tubular surfaces formed by cavities // Heat Transfer Research: Volume 29 № 1 (1998), с 8-13 (ISSN: 1064-2285). Індексуються у Scopus. <http://www.dl.begellhouse.com/references/46784ef93dddff27,2906653112975831,159ff3ec19ab21f1.html>

9. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Geletukha G.G. Heat transfer from a horizontal cylinder with cavities under water pool boiling conditions // Heat Transfer Research: Volume 29 № 4 (1998), с 275-280 (ISSN: 1064-2285). Індексуються у Scopus. <http://www.dl.begellhouse.com/journals/46784ef93dddff27,27da601e47fce063,06ca642404b5a9c9.html>

10. Borisov I.I., Khalatov A.A., Geletukha G.G., Kobzar' S.G., Shevtsov S.V. Heat exchange during cooling the producer gas in vortex bubbling unit // Xinxing Jianzhu Cailiao// New Building Materials, January 1998. Індексуються у Scopus.

11. Гелетука Г.Г. Аналіз концепції зеленого енергетичного переходу України до 2050 р. // Біоенергетика: 2020, № 1 (15), с. 38-39.

12. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В., Баштовий А.І. Потенціал та перспективи енергетичного використання агробіомаси в Україні. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 42 № 1 (2020), с. 42-51. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.5>

13. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №2. – С. 60-67. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.6>

14. Гелетука Г.Г. Аналіз виробництва пелет та брикетів з побічної продукції кукурудзи на зерно в Україні. // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №2. – С. 83-91. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/399>

15. Гелетука Г.Г. Застосування ТЕЦ на біомасі для балансування енергосистеми України. // Теплофізика та теплоенергетика, 2020. – Т. 42, №3. – С. 47-55. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/405>

16. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В., Баштовий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 2. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 1 (2019), с. 67-73. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2019.9>

17. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Частина 1. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 3 (2019), с. 77-84. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.11>
18. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Аналіз бар'єрів для виробництва енергії з агробіомаси в Україні. Частина 2 // Теплофізика та теплоенергетика. 2019, т. 41, № 4, с. 44-50. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.6>
19. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 1, с. 61-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>
20. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 1, с. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>
21. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І., Гелету́ха Г.І. Проблеми та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 2, с. 41-48. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.06>
22. Г.Г. Гелету́ха, Т.А. Желе́зна, С.В. Драгне́в, А.І. Башто́вий, І.Л. Роговський. Обґрунтування типових проєктів виробництва і споживання паливних брикетів з агробіомаси в Україні // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка і енергетика АПК. 2018, вип. 282, с. 173-181. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuau_tech_2018_282_16
23. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Башто́вий А.І. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1. // Промислова теплотехніка. 2018, т. 40, № 4, с. 62-68 <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.09>
24. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Енергетичний та екологічний аналіз технологій виробництва електроенергії з твердої біомаси. Частина 1 // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 1, с. 58-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.09>
25. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 2, с. 60-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.09>
26. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Енергетичний та екологічний аналіз технологій виробництва електроенергії з твердої біомаси. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 3, с. 73-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.11>
27. Драгне́в С.В., Желе́зна Т. А., Гелету́ха Г. Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. Частина 1 // Біоенергетика/Bioenergy. 2016, №1 (7). с. 18-22.
28. Драгне́в С.В., Желе́зна Т. А., Гелету́ха Г. Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. Частина 2 // Біоенергетика/Bioenergy. – 2016, №2 (8). с. 16-20.
29. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Частина 1 // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 2, с. 56-64. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.07>
30. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Башто́вий А.І. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 3, с. 57-66. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2016.08>

31. Железна Т.А., Баштовий А.І., Гелетуха Г.Г. Аналіз можливості отримання деревного палива з додаткових джерел в Україні // Промислова теплотехніка. 2016, т. 38, № 4, с. 71-77. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.08>
32. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 1, с. 53-62. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2015.07>
33. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 2, с. 68-76. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2015.08>
34. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 3, с. 65-73. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2015.08>
35. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 1. // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 4, с. 53-60. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.06>
36. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 2. // Промышленная теплотехника. 2015, т. 37, № 5, с. 58-67. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.07>
37. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Біоенергетика в Україні: стан розвитку, бар'єри та шляхи подолання // Біоенергетика. 2014, № 1 (3), с. 16-19.
38. Гелетуха Г.Г., Крамар В.Г. Методика попередньої техніко-економічної оцінки та вибору парових турбін для проектів ТЕЦ на біомасі в комунальному теплопостачанні. Частина 1 // Промислова теплотехніка 2014. т. 36, №1. с. 66-73.
39. Гелетуха Г.Г., Крамар В.Г. Методика попередньої техніко-економічної оцінки та вибору парових турбін для проектів ТЕЦ на біомасі в комунальному теплопостачанні. Частина 2 // Промислова теплотехніка 2014. т. 36, №2. с. 78-85.
40. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 4, с.36-42.
41. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 5, с.73-80.
42. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2014, т. 36, № 6, с.78-88.
43. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Место биоэнергетики в проекте обновленной Энергетической стратегии Украины до 2030 года // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 2, с.64-70.
44. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома // Промислова теплотехніка. 2013, т. 35, № 3, с.56-63. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2013/06/complex-analysis-article-zheliezna.pdf>
45. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 2. Деревина // Промислова теплотехніка. 2013, т. 35, № 4, с.56-62.

46. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Барьеры для развития биоэнергетики в Украине. Часть 1 // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 4, с.63-71.
47. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Барьеры для развития биоэнергетики в Украине. Часть 2 // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 5, с.43-47.
48. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Олейник Е.Н. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине // Промышленная теплотехника. 2013, т. 35, № 5, с.48-57.
49. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Олейник Е.Н., Гелетуха А.И. Перспективы производства электрической энергии из биомассы в Украине // Промышленная теплотехника 2013, т. 35, № 6, с.67-75.
50. Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Куцый Д.В., Гелетуха А.И. Перспективы производства и использования биогаза в Украине // Промышленная теплотехника 2013, т. 35, № 6, с.76-82.
51. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з біомаси // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №1, с.87-95.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/59059/11-Geletukha.pdf?sequence=1>
52. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Аналіз механізмів стимулювання виробництва теплової енергії з біомаси в Європейському союзі // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №3.- С. 67-72.
53. Гелетуха Г.Г., Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., Ходаковская Т.В., Гелетуха А.И. Анализ необходимости применения в Украине «зеленого» тарифа на электроэнергию, вырабатываемую из биогаза // Промышленная теплотехника. 2012, Т.34, №4, - С.67-74.
54. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Возобновляемые источники энергии в Украине: стимулы и барьеры // Промышленная теплотехника. 2012, т. 34, №5. С. 58-63.
55. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Жовмір М.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.И. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз // Промислова теплотехніка. 2011, т. 33, № 1, с.57-64.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60302/09-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>
56. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Гелетуха Г.Г. Дослідження ефективності сумісного зброджування гною свиней та силосу кукурудзи // Механізація, екологізація і конвертація біосировини в тваринництві. 2011, №1(8) с. 92-100.
57. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И. Аналіз механізмів стимулювання розвитку «зеленої» електроенергетики в Європейському Союзі // Промислова теплотехніка. 2011, т. 33, № 5, с.35-41.
58. Гелетуха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Біомаса як паливна сировина // Промышленная теплотехника. 2011-, т. 33, №5. с. 76-84.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60379/11-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>
59. Гелетуха Г.Г. Железная Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Частина 2 // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 4. с. 94-100.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60593/12-Geletukha.pdf?sequence=1>
60. Гелетуха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих

туків соломи // Промышленная теплотехника. 2010, т. 32, №6. с. 45-51.
<http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60620/07-Geletukha.pdf?sequence=1>

61. Г.Г. Гелетука, Т.А. Железна, М.М. Жовмір, Ю.Б. Матвеев, О.І. Дроздова. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 6. с. 58-65.
<http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60622/09-GeletukhaNEW.pdf?sequence=1>

62. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Матвеев Ю.Б., Жовмір М.М. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні // Промышленная теплотехника. 2006, т. 28, № 2, с. 85-93.
<http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61394/12-Geletukha.pdf?sequence=1>

63. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Жовмір М.М. Виробництво енергії з місцевих видів палива в Україні // Науковий вісник Національного аграрного університету. 2006, вип. 95. с. 118-127.

64. Гелетука Г.Г., Железная Т.А., Жовмир Н.М., Матвеев Ю.Б. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине // Промышленная теплотехника. 2005, т. 27, № 1, с. 78-85.

65. Гелетука Г.Г., Железная Т.А., Тишаев С.В., Кобзарь С.Г. Развитие биоэнергетических технологий в Украине // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 3, с. 3-11.

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації:

66. Geletukha G., Zheliezna T. Bioenergy in Ukraine: State of the art and prospects for the development // Proceedings of 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France. – P. 2106-2108. URL: https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2012/08/OC12_4_Geletukha_Paper_18_BM_Conf_Lyon_2010a.pdf

67. Geletukha G., Edward Smeets, APC Faaijs and others. A Review and Harmonization of Biomass Resources Assessments // Proceedings of 17th European Biomass Conference & Exhibition “From Research to Industry and Markets”, Hamburg, Germany, 29 June-03 July 2009, P. 364-374.

68. Geletukha, G., Zheleyezna, T., Matveev, Y., Zhovmir, M. Analysis of the Present State and Prospects for Bioenergy Development in Ukraine // Proceedings of 16th European Biomass Conference and Exhibition «From Research to Industry and Markets», 2-6 June 2008, Valencia, Spain, p. 2570-2573.

69. G.Geletukha, P.Kucheruk, Yu.Matveev. Status and prospects of biogas energy use in Ukraine // Proceedings of the International Conference “Progress in Biogas. Biogas production from agricultural biomass and organic residues”, 18-21 September 2007, Stuttgart, Germany, p.29-34. URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21085528>

70. T. Zhelyezna, G. Geletukha, O. Morozova. Production of Liquid Biofuels in Ukraine: Present Status and Prospects // Proceedings of 15th European Biomass conference. 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2628-2630.

71. Sergii Chaplygin, Mykola Zhovmir, Georgiy Geletukha, Yevgen Oliynik. Experimental investigation of baled straw burning // Book of proceedings 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition BIOENERGY 2007, 3-7 September 2007, Jyvaskyla, Finland, p. 535-539.

72. M. Zhovmir, G. Geletukha, S. Chaplygin, Ye. Oliynik. Energy Efficiency and Pollutants Emission at Whole Straw Bales Combustion // Proceedings of 15th European Biomass Conference and Exhibition From Research to Market Deployment, 7-11 May 2007, Berlin, Germany, p. 2433-2435.

73. Geletukha G., Zhelyezna T., Matveev Yu., Zhovmir N. Bioenergy Development in Ukraine: Present Status, Perspectives and New Possibilities in Frame of Kyoto Protocol Mechanisms // Труды 14-й Европейской конференции «Биомасса для производства энергии, промышленности и защиты климата», 17-21 октября, 2005 г, Париж, Франция, с. 1518-1521.

74. Гелетука Г.Г. Использование промышленных, лесных и сельскохозяйственных отходов для получения энергии в Украине // Труды 2-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ», 9-10 февраля 2005 г., Харьков, Украина, с.332-336.

75. Гелетука Г.Г., Матвеев Ю.Б. Системы сбора и утилизации биогаза на полигонах твердых бытовых отходов в Украине: опыт и перспективы // Труды 2-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ», 9-10 февраля 2005 г., Харьков, Украина, с.257-260.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

76. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: Справочное пособие в 3-х частях. Часть 3: Инновационные технологии для когенерации / Клименко В.Н., Мазур А.И., Письменный Е.Н., Багрий П.И., Гелетука Г.Г. Київ: ИПЦ АЛКОН НАН України, 2016. 528 с.

77. Биоэнергетика в Украине: текущее состояние и перспективы развития: монография / Гелетука Г.Г., Железная Т.А, Олейник Е.Н.. Lambert Academic Publishing, 2014. 88 с.

78. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / уклад.: Лакида П.І., Гелетука Г.Г., Василишин Р.Д., Железна Т.А., та ін., відповід. наук. ред.: д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2011. 28 с.

79. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації: колективна монографія у 2-х томах/ кол. авторів за заг. ред. А.А. Долінського, Б.І Баска, Є.Т. Базєєва, І.А. Піроженко. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2007. Гелетука Г.Г. Заходи щодо заміщення природного газу біомасою. том 2, с. 418-431.

80. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти: колективна монографія / кол. авторів за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтавська державна аграрна академія, Опольський університет (Польща). Полтава: ПП «Астроя», 2019. 603 с. Гелетука Г.Г., Олійник Є.М., Зубенко В.І. Роль біомаси для досягнення глобальних та національних цілей зі зниження викидів парникових газів, с. 457-462. Гелетука Г.Г., Антоненко В.О., Радченко С.В. Забезпечення екологічних вимог при виробництві енергії з біомаси, с 463-468. Гелетука Г.Г., Олійник Є.М., Зубенко В.І. Енергетичні властивості біомаси та економічна ефективність виробництва теплової енергії, с 469-474.

81. Проведення комплексного дослідження ринку котлів, що працюють на біомасі в Україні / Г.Гелетука, Є.Олійник, В.Антоненко, С.Чаплигін, В.Зубенко, С.Радченко. Програма розвитку ООН. Київ, 2016. 212 с.

82. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси / Г.Гелетука, В.Крамар, О.Епік, Т.Антощук, В.Тітков. Програма розвитку ООН. Київ, 2016. 334 с.

83. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні: практ. посіб. / Олійник Є., Антоненко В., Чаплигін С., Зубенко В., Железна Т., Гайдай О., Крамар В., Епик О. за ред. Г. Гелетуخی. Київ.: Поліграф плюс, 2015. 72 с.

84. Практичний посібник з використання біомаси у муніципальному секторі України (для представників агропромислового комплексу) / Г.Гелетуха, С.Драгнєв, П.Кучерук, Ю.Матвєєв. Програма розвитку ООН. Київ, 2017. 70 с.

85. Практичний посібник з використання біомаси у муніципальному секторі України (для представників державних установ та громадських організацій, що працюють в сфері екології) / Г.Гелетуха, Ю.Матвєєв, Є.Олійник, Д.Куций. Програма розвитку ООН. Київ, 2017. 54 с.

86. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы / Г.Г. Гелетуха, П. Кучерук, Ю. Матвеев, Д. Науменко, А Станев, Л. Матиюк. Киев-Гюльцов FNR, 2013. 72 с.

87. Організаційно-економічні механізми модернізації теплоенергетики України: тематичний збірник матеріалів / заг. ред. чл.-кор. НАНУ Б.І. Баска. Київ: Калита, 2015. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Драгнєв С.В. Ефективність застосування поточних організаційних заходів виконавчої влади з енергоефективності, енергозбереження та зменшення споживання природного газу. с. 179-187.

88. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Проблеми та перспективи розвитку когенерації в Україні. // Теплофізика та теплоенергетика: Том 41 № 1 (2019), с. 59-66. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.8>

89. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І. Проблеми та перспективи довгострокового планування у секторі тепlopостачання України. // Теплофізика та Теплоенергетика: Том 41 № 2 (2019), с. 72-77. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.10>

90. Установка для швидкого піролізу біомаси: пат. [на винахід](#) Україна № 116598; заявл. 20.12.2016; опубл. 10.04.2018, бюл. № 7. Гелетуха Г.Г.; Зубенко В.І.; Антошук Т.О.; Епик О.В.

АНОТАЦІЯ

Гелетуха Г.Г. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2021.

Розроблено наукові засади комплексного використання наявної в Україні біомаси для виробництва теплової і електричної енергії, а також виконано оцінку екологічного впливу спалювання біологічних видів палива на оточуюче середовище.

Розроблено методичні засади оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, в якій уточнено відсоток теоретичного потенціалу ПП с-г культур, що може бути використаний для виробництва енергії. Оцінено енергетичні потенціали біомаси ряду областей та України в цілому. Розроблено дорожню карту розвитку біоенергетики України до 2050 р., яка враховує динаміку застосування твердих біопалив, біогазу, біометану, рідких біопалив при виробництві теплової та електричної енергії, а також в якості моторних палив.

Для умов України проаналізовані можливості енергетичного використання ПП кукурудзи. Виконано аналіз енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. Проаналізовані можливості застосування електрогенеруючих потужностей на біомасі, біогазі і біометані для балансування енергетичної системи України.

Проведено експериментальні дослідження та розроблено технології і обладнання для виробництва і споживання біологічних видів палива. Отримала подальший розвиток технологія спалювання відходів деревини в котлах з топковим пристроєм ретортного типу, що дозволило розширити сфери застосування технології на деревне паливо з вологістю до 50%. Отримала подальший розвиток технологія спалювання соломи в водогрійних котлах періодичної дії, в якій шляхом підбору ряду конструктивних та експлуатаційних параметрів досягнуто стабільне вигоряння тюка, забезпечення стабільних показників поточної теплової потужності котла, зменшення емісії CO.

Отримала подальший розвиток технологія спалювання малих тюків соломи в водогрійних котлах ретортно-сигарного типу, в яких організоване безперервне стабільне спалювання цілих малих тюків соломи та забезпечені помірні викиди шкідливих речовин. Отримала подальший розвиток технологія анаеробного зброджування ПП АПК (солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника).

Виконано ТЕО ряду нових і перспективних для України біоенергетичних технологій: заготівлі ПП кукурудзи; виробництва гранул і брикетів з ПП кукурудзи; анаеробного зброджування ПП АПК; виробництва і використання біометану.

Ключові слова: біологічні види палива, біомаса, спалювання біомаси, анаеробне зброджування, енергетична ефективність, шкідливі викиди.

ABSTRACT

Geletukha G.G. Scientific and Technical Principles of Energy Production from Biofuels. - Manuscript.

Thesis for obtaining the doctor of sciences degree in technical sciences on the specialty 05.14.08 - transformation of renewable energy sources. - Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Scientific bases of complex use of biomass available in Ukraine for production of heat and power, and ecological influence of burning of biofuels on environment are developed.

A method for estimation of energy potential of biomass has been developed, which specifies the percentage of the theoretical potential of agricultural crops residues that can be used for energy production, as well as takes into account new current and forecast components of this potential. Based on the developed methodology, the bioenergy potentials for a number of oblasts and Ukraine as a whole were assessed. A roadmap for the development of bioenergy in Ukraine until 2050 has been developed, which takes into account the dynamics of the use of solid biofuels, biogas, biomethane, liquid biofuels in the production of heat and power, as well as transport fuels.

The possibilities of energy use of maize residues are analyzed for the conditions of Ukraine. The analysis of energy efficiency and reduction of greenhouse gas emissions under corn stems utilization in the form of bales, pellets and briquettes for heat production is performed. Possibilities of power generating capacities on biomass, biogas and biomethane for balancing of energy system of Ukraine are analyzed.

Experimental research has been conducted and technologies and equipment for the production and consumption of biological fuels have been developed. The technology of wood waste incineration in boilers with a retort-type furnace was developed, which allowed to expand the application of the technology for wood fuel with humidity up to 50%. The technology of straw burning in hot water boilers of periodic combustion was developed, in which stable combustion and elimination of incomplete bale combustion indicators of the current thermal capacity of the boiler, reduction of CO emissions were reached by optimization of a number of design and operational parameters.

The technology of small bales of straw burning in the boilers of retort-cigar type has been developed, in which continuous stable burning of small bales of straw is organized and moderate emissions of harmful substances are provided. The technology of anaerobic fermentation of lingo-cellulosic agro-residues (straw, corn stalks and sunflower husk) was developed.

Feasibility studies of a number of new and promising bioenergy technologies for Ukraine have been performed: collection of corn stems; production of pellets and briquettes from corn stems; anaerobic fermentation of agro residues; production and use of biomethane.

Key words: biofuels, biomass, biomass combustion, anaerobic digestion, energy efficiency, harmful emissions.