

**Технології та обладнання для виробництва і споживання альтернативних  
видів палива**

**РЕФЕРАТ**

Автори:

**ГЕЛЕТУХА Георгій Георгійович**, к.т.н., завідувач лабораторії  
Інституту технічної теплофізики НАН України,

**ПЕТРОВА Жанна Олександрівна**, д.т.н., завідувач лабораторії  
Інституту технічної теплофізики НАН України,

**КОРІНЧУК Дмитро Миколайович**, к.т.н., провідний науковий  
співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України,

**ЖЕЛЄЗНА Тетяна Анатоліївна**, к.т.н., провідний науковий  
співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України,

**П'ЯНИХ Костянтин Євгенович**, д.т.н., завідувач відділу Інституту газу  
НАН України,

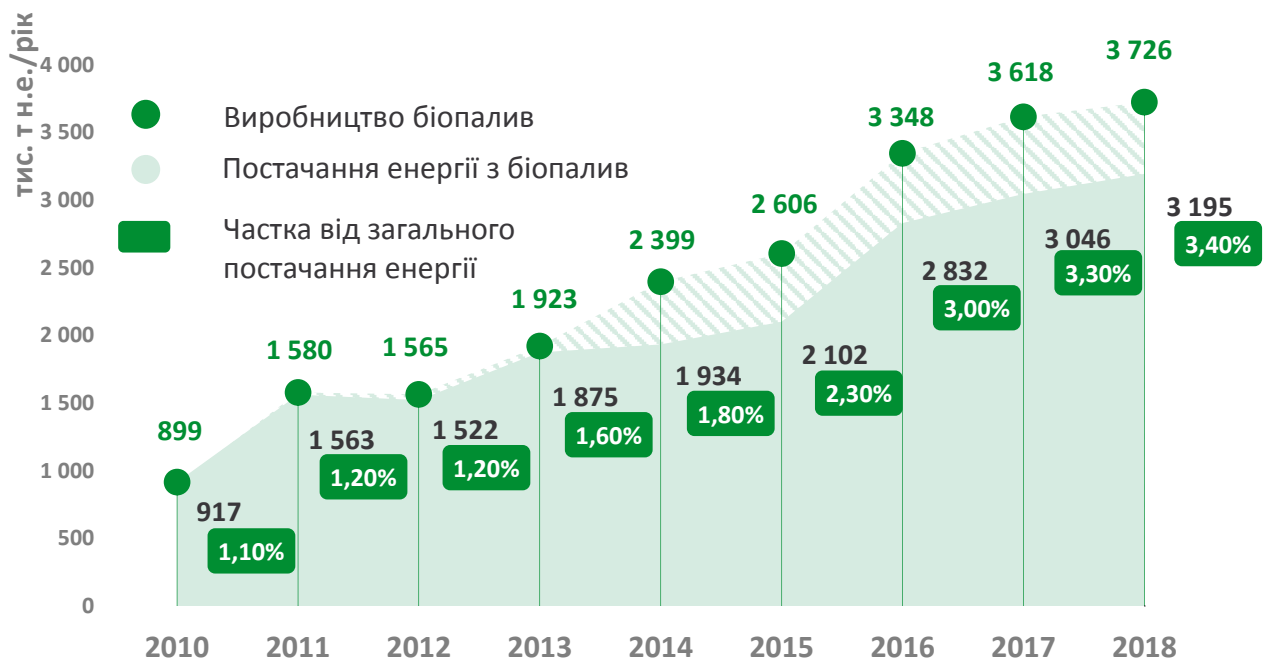
**КРІГЕР Леонід Фрідріхович**, генеральний директор ТОВ  
"КОТЛОЗАВОД "КРІГЕР",

**САВЧУК Сергій Дмитрович**, виконавчий директор ТОВ "КЛІАР  
ЕНЕРДЖІ",

**ПОНІКАРЧУК Анатолій Миронович**, директор ТОВ «Волинь-  
Кальвіс».

## Вступ

В Україні спостерігається стала тенденція збільшення обсягів виробництва енергії з альтернативних видів палива, зокрема, з біомаси. За даними енергетичного балансу України за 2018 рік, загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів становило **3195** тис. т н.е., що еквівалентно заміщенню **4 млрд м<sup>3</sup>/рік** природного газу. Частка біопалива у загальному постачанні первинної енергії складає **3,4%** (понад 70% від загального постачання енергії з відновлюваних джерел). Зростання сектору за 2010-2018 рр. становить в середньому **31%** на рік.



**Рис. 1.** Виробництво і споживання біопалива в Україні в 2010 – 2018 рр.

Згідно діючої енергетичної стратегії, внесок біомаси, біопалива та відходів у загальне постачання первинної енергії у 2035 році має становити **11** млн. т н.е. Мета, поставлена в Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання, – збільшення частки використання альтернативних джерел енергії у виробництві теплової енергії до **40%** у 2035 році.

## Мета роботи

Метою роботи є розробка наукових засад та комплексу технологій для виробництва і споживання альтернативних видів палива, зокрема, твердих видів біопалива (гранули і брикети з біомаси, дрова, тріска, лушпиння соняшника, відходи і залишки аграрного виробництва), біогазу зі звалищ твердих побутових відходів, торфу, композиційного палива на основі біомаси і торфу, а також організація широкого впровадження цих технологій.

## **Наукова новизна роботи**

Розроблено наукові засади виробництва і споживання альтернативних видів палива. Зокрема, розроблено методику оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, яка включає оцінку теоретичного, технічно досяжного та економічного потенціалу біомаси, придатної для енергетичного використання в Україні.

Вперше в світі розроблено склад та режими виробництва композиційного біопалива з рослинної біомаси та торфу, що забезпечило підвищення продуктивності заводів в середньому на 17%, покращення якісних показників палива, а саме, зменшення зольності до 5-15%, підвищення теплоти згорання та міцності, відповідно, на 15% та 50%.

Теоретично та експериментально досліджено процес вигорання часток твердого біопалива (тирси та лушпиння соняшника) в потоці та проведено аналіз його залежності від їх вологості та фракційного складу.

Виконано комплексний аналіз енергетичної та екологічної ефективності технологій виробництва теплової енергії з біомаси за весь період життєвого циклу проекту з використанням наступних показників: коефіцієнт перетворення енергії, питомі сукупні витрати енергії, скорочення викидів парникових газів.

Досліджено експлуатаційні параметри газозбірних свердловин при роботі систем збору біогазу на полігонах твердих побутових відходів України. Розроблено комплексну методику експериментальних досліджень газоутворення на звалищах та полігонах, яка дала змогу отримати базу експериментальних даних для верифікації результатів моделювання газоутворення.

Розроблено комплекс технологій для виробництва і споживання альтернативних видів палива. Зокрема, розроблено інноваційну ресурсозберігаючу технологію комплексної переробки торфу на композиційне паливо та гумінові добрива, яка дозволяє вилучати з торфу до 20% гумінових речовин для виробництва високоефективного добрива.

Розроблено технологію ефективного спалювання низькоякісних видів біопалива (високозольних, підвищеної вологості до 50%, з нерівномірним фракційним складом) в топках з ретортною подачею палива і решітками допалювання, яка дозволяє зменшити рівень емісії забруднюючих речовин до 50% порівняно з традиційними конструкціями топкових пристроїв. Розроблено технологію заміщення природного газу біомасою у великих обертових печах. Розроблено технології спалювання твердого біопалива вологістю до 55% на рухомих колосникових решітках.

Визначено оптимальні режими роботи газозбірних свердловин, при яких досягаються максимальні ефективність збору біогазу та скорочення емісій парникових газів.

### **Зміст роботи**

Розглянуто паливні гранули як композиційний біополімер з неорієнтованою структурою та обґрунтовано доцільність використання композицій в виробництвах пресованого палива, що започаткувало новий інноваційний підхід до виробництва паливних гранул. Розроблено композиційний склад гранул та брикетів на основі торфу та рослинної біомаси. Обґрунтовано енерго-ресурсозберігаючі режими виробництва **композиційного біопалива з рослинної біомаси та торфу**, що забезпечують підвищення теплоти згорання на 15-30%, мінімальну втрату калорійної складової та стабільне гранулоутворення.

Розроблено енергоефективну сушарку з динамічним регулюванням кута нахилу, що забезпечило підвищення енергоефективності установки на 10-15%. Розроблено математичну модель високотемпературного сушіння поліфракційних композиційних сумішей та обґрунтовано комбіновану схему сушіння біомаси в аеродинамічних багатосекційних сушарках, яка забезпечує зниження енерговитрат на 22%.

Вперше в світі розроблено інноваційну ресурсозберігаючу технологію комплексної переробки торфу на композиційне паливо та гумінові добрива, що дозволило вилучати до 80% гумінових речовин з торфу для виробництва вискоефективного добрива. Досліджено, що доза 5 т/га нового торф'яного добрива істотно підсилює мінералізацію органічної речовини ґрунту: втрати вуглецю органічної речовини добрива становлять 0,98%, втрати гумусу ґрунту - 1,1%. Дози 10, 25 і 50 т/га збагачують ґрунт органічною речовиною внесеного добрива відповідно на 0,08, 0,19, 0,38% і збільшують вміст гумусу в ґрунті відповідно на 0,39, 0,22% і більше, сприяючи синтезу гуміно-подібних речовин.

Розроблено та досліджено **технологію спалювання низькоякісних видів біопалива** (високозольних, підвищеної вологості до 50%, з нерівномірним фракційним складом) в топках з ретортною подачею палива і решітками допалювання. Досягнуто зменшення рівня емісії забруднюючих речовин до 50% порівняно з типовими конструкціями топкових пристроїв.

Розроблено конструкцію водогрійного котла для спалювання малих туків соломи у створеному топковому пристрої ретортно-сигарного типу. Досягнуто теплове напруження дзеркала горіння у 900 кВт/м<sup>2</sup>. Встановлено, що емісія CO

та NO<sub>x</sub> при спалюванні в такому топковому пристрої відповідає значенням, характерним для кращих соломоспалюючих котлів країн ЄС. Розроблено, досліджено та виготовлено дослідно-промислові зразки соломоспалюючих котлів потужністю 100, 250, 350 та 500 кВт. Підтверджено їх високі енергетичні та екологічні показники.

Розроблено і досліджено **технологію швидкого абляційного піролізу біомаси для виробництва біонафти** (фінансування U.S. Department of Energy, PNNL по програмі IPP). Вперше в світі розроблено, побудовано та доведено до працездатного стану пілотну піролізну установку шнекового типу. Відпрацьовано процес отримання піропалива з деревної тирси в реакторі з конусним шнеком. Визначено режимні параметри, за яких можливо отримати максимальний вихід рідкого піропалива, що склав **51%** від маси вхідної сировини. Визначено та обґрунтовано необхідні температурні умови та інтенсивність нагріву біомаси при швидкому абляційному піролізі. Розроблено рекомендації щодо оптимізації процесу.

Виконано **комплексний аналіз енергетичної та екологічної ефективності технологій виробництва теплової енергії з біомаси** за весь період життєвого циклу проекту з використанням наступних показників: коефіцієнт перетворення енергії, питомі сукупні витрати енергії, скорочення викидів парникових газів. Аналіз проводився для тюкової соломи і гранули з неї, тріски та гранул з лісосічних відходів, а також таких енергетичних культур, як верба та міскантус, з використанням методології оцінки життєвого циклу та з урахуванням вимог сталого розвитку. Результати аналізу показали, що виробництво теплової енергії з твердого біопалива задовольняє вимогам сталого розвитку за енергетичними показниками та за скорочення викидів парникових газів при відстанях транспортування від 100 до 270 км в залежності від виду біопалива. Результати досліджень передані в Держенергоефективності.

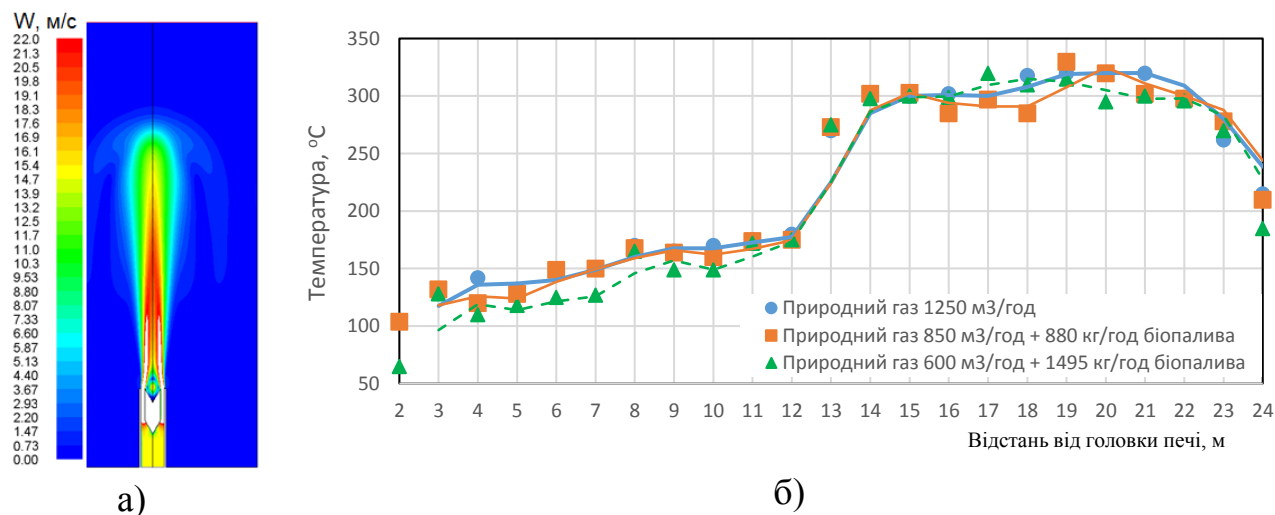
Розроблено комплексну методику експериментальних досліджень звалищ та полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). Методику апробовано на кількох звалищах та полігонах України, що дало змогу отримати базу експериментальних даних, яка була використана для верифікації результатів моделювання газоутворення.

Розроблено, спроектовано та введено в експлуатацію **системи збору та утилізації біогазу на полігонах твердих побутових відходів**. Для Хмельницького полігона ТПВ впроваджена система збору і утилізації біогазу, яка використовується для обігріву виробничого приміщення за допомогою 4 інфрачервоних обігрівачів потужністю 120 кВт. Введена в експлуатацію

система збору і утилізації біогазу на Приморському полігоні ТПВ м. Маріуполь, технічний проект якої було розроблено авторами.

Виміряно експлуатаційні параметри газозбірних свердловин при роботі системи збору біогазу. Визначено оптимальний режим роботи газозбірних свердловин, при якому досягається максимальна ефективність збору біогазу та скорочення емісій парникових газів.

Теоретично та експериментально досліджено процес вигорання часток твердого біопалива – тирси та лушпиння соняшнику в потоці та проведено аналіз його залежності від їх вологості та фракційного складу. Розроблено технологію **заміщення природного газу біомасою у великих обертових печах**. Розроблено та затверджено технічні умови на паливо «Лушпиння соняшникове подрібнене», сумарні обсяги виробництва якого підприємствами України на сьогодні перевищують 100 тис. т/рік.



**Рис.2.** Дослідження умов спалювання твердого палива в умовах факельного горіння у обертовій печі; а) – моделювання процесу; б) налагоджування за непрямыми вимірюваннями тепловиділення за температурою броні обертової печі.

Виконано порівняльний аналіз ефективності прямого спалювання і газифікації. Показано, що газифікація може бути конкурентною до прямого спалювання при використанні генераторного газу для виробництва електричної енергії, у когенераційних технологіях, при сумісному спалюванні генераторного та природного газу. Розроблено технологію та обладнання для газифікації біомаси з подальшим використанням виробленого генераторного газу. Розроблено газогенератор періодичної дії та технологію підготовки генераторного газу.

Результати наукових досліджень і розроблені технології широко впроваджено у серійне виробництво на підприємствах учасників роботи. Освоєно серійне виробництво твердопаливних водогрійних, парових та термомасляних котлів потужністю до 10 МВт з механізованим процесом спалювання палива вологістю до 55% на рухомій колосниковій решітці (котлозавод «Крігер»). Котли відрізняються повною автоматизацією подачі палива і видалення золи, моніторингом і автоматичною оптимізацією первинного і вторинного дуття, системою рециркуляції димових газів, оптимальною конструкцією подвійних бетонних перекриттів і внутрішньої геометрії топки, інтелектуальною системою управління процесом горіння, роботи котла в цілому, а також механізмами подачі палива та золовидалення. Котли мають сучасний компактний дизайн і високу надійність, гарантовані екологічні показники і високий ККД (до 87%), низькі експлуатаційні витрати та широкий модельний ряд. Впроваджено більше 3000 проектів. Експлуатується 5 власних енергетичних об'єктів.



**Рис. 3.** Впроваджені котельні на альтернативних видах палива.

Розроблено спеціальну лінійку котлів для ринку ЄС та виготовлено **52** котли загальною потужністю 91 МВт для французького споживача. Поставлено **29** водогрійних котлів загальною потужністю 47 МВт до Великобританії. 19 з них є когенераційними установками.

Спроектовано, побудовано і введено в експлуатацію унікальну біо-ТЕЦ з циклом ORC, теплова потужність – 39 МВт, електрична потужність – 1,6 МВт, паливо – тріска та біомаса аграрного походження, природний газ як резервне паливо. Проект включає два твердопаливних котла загальною потужністю 15 МВт та два резервних газових котла потужністю 12 МВт кожен. Електрогенеруючий модуль об'єкту обладнано сучасною ORC турбіною.

Освоєно серійне виробництво понад 50 видів твердопаливних котлів різних модифікацій потужністю від 6 кВт до 1,5 МВт для українського і європейського ринку (ТОВ «Волинь-Кальвіс»). Випущено понад 665 МВт загальної потужності промислових котлів одиначною потужністю від 70 до 1500 кВт: котли ручного завантаження, механізовані котли ретортного типу, механізовані котли з рухомими колосниками. Робота котлів повністю автоматизована, в т.ч., подача палива, очистка конвективної частини теплообмінника та золовидалення. Котли обладнані системою моніторингу і автоматичною оптимізацією первинного і вторинного дуття, а також системою рециркуляції димових газів. В димових трубах встановлені турбулізатори, завдяки чому збільшується ефективність теплопередачі. Топка викладена шамотною цеглою, що покращує ефективність і стабільність горіння. Труби стін топки, по яких циркулює теплоносій, частково охолоджують топку, завдяки чому не досягаються критичні температури шлакування золи та понаднормативне утворення викидів  $\text{NO}_x$ .



**Рис. 4.** Впроваджена електростанція потужністю 600 кВт на біогазі зі звалищ ТПВ в м. Івано-Франківськ.

Впроваджено 14 електрогенеруючих проектів на альтернативних видах палива загальною електричною потужністю 15,2 МВт (ТОВ «Кліар Енерджі»). Зокрема, впроваджено 12 проектів збирання та енергетичного використання біогазу з полігонів ТПВ (сумарна потужність - 10,7 МВт<sub>ел</sub>), ТЕС на біомасі (паровий цикл - 4 МВт<sub>ел</sub>) та ТЕЦ на біомасі за технологію термохімічної газифікації (0,5 МВт<sub>ел</sub> + 0,8 МВт<sub>т</sub>). Розроблено і впроваджено унікальну технологію газифікації біомаси, яка забезпечує збільшення електричного ККД такої ТЕЦ до 25% та гарантує роботу щонайменше 7600 робочих годин на рік.



## **Практична значимість роботи**

Впроваджено виробництво та використання композиційних гранул та брикетів на основі торфу та рослинної біомаси (ТБЗ «Сойне», ТБЗ «Маневицький», ТБЗ «Ірванцівський» та ТБЗ Смолинський», ТОВ «Волинь-Кальвіс»), що забезпечило підвищення продуктивності заводів в середньому на 17%, зменшення зольності до 5-15%, підвищення теплоти згоряння та міцності відповідно на 15% та 50%. Впроваджено енергоефективну сушарку з динамічним регулюванням кута нахилу на підприємстві (ТОВ «Нова Енергія», ТОВ «Брикет-центр», смт. Сосниця).

Розроблено технологію заміщення природнього газу твердим біопаливом в обертових печах, яку впроваджено на більшості обертових печей України: ПАТ "Ватутінський комбінат вогнетривів", ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (виробництво вапна на печах №4 та №5 з 2014 р.); ПрАТ «Запоріжвогнетрив» (обпалювання шамоту на печі №3 з 2015 р.); ПрАТ «Полтавський ГЗК» (обпалювання окатишів на печах №3 та №4 з 2016 р.); ПАТ "Любомирський вапняно-силікатний завод" (виробництво вапна на печі №1 з 2016 р.).

Розроблено і впроваджено газогенератори для ковальської печі на Золотоноському машинобудівному заводі та на ПАТ "Малинська паперова фабрика - Вайдманн". Розроблено та впроваджено пальник для спалювання природнього та генераторного газів. Технологія впроваджена при створенні електростанції потужністю 75 кВт, м. Єлена, Болгарія. Досягнуто електричний ККД комплексу 25%. Створено та впроваджено установку для виробництва тарифікованого біопалива потужністю 200 кг/год.

Розроблено і серійно випускаються твердопаливні водогрійні, парові та термомасляні котли з механізованим процесом спалювання палива вологістю до 55% на рухомій колосниковій решітці. Випущено понад 1400 МВт загальної потужності промислових котлів одиничною потужністю від 1 до 10 МВт. Побудовано і введено в експлуатацію унікальну біо-ТЕЦ з циклом ORC. Теплова потужність – 39 МВт, електрична потужність – 1,6 МВт.

Розроблено понад 50 видів твердопаливних котлів різних модифікацій для українського і європейського ринку. Випущено понад 665 МВт загальної потужності промислових котлів одиничною потужністю від 70 до 1500 кВт.

Впроваджено 12 проектів збирання та енергетичного використання біогазу з полігонів твердих побутових відходів (сумарна потужність - 10,7 МВт<sub>ел</sub>), ТЕС на біомасі (паровий цикл - 4 МВт<sub>ел</sub>) та ТЕЦ на біомасі за технологію термохімічної газифікації (0,5 МВт<sub>ел</sub> + 0,8 МВт<sub>т</sub>). Розроблено і

впроваджено унікальну технологію газифікації біомаси, яка забезпечує збільшення електричного ККД такої ТЕЦ до 25%.

Оцінено енергетичний потенціал біомаси, який становив в 2018 року близько **23** млн. т н.е./рік. Ця оцінка лягла в основу формування енергетичної політики України. За активною участю авторів розроблено енергетичну стратегію України на період до 2035 року, де зафіксовані цілі з розвитку сектору біоенергетики - **11** млн. т н.е. постачання первинної енергії у 2035 за рахунок біомаси, біопалива та відходів. За активною участю авторів сформовано законодавче поле для розвитку біоенергетики, зокрема, закони України «Про альтернативні джерела енергії», «Про альтернативні види палива», «Про теплопостачання» та ряд інших нормативно-правових актів.

В цілому за період 2000-2019 рр. розроблено і впроваджено понад **5000** котлів на біомасі, **6** обертових печей на біомасі, **15** ТЕС/ТЕЦ на біомасі та біогазі, **12** систем збирання та утилізації біогазу на полігонах ТПВ. Продана ліцензія на два патенти України у В'єтнам. Розроблено та затверджено **5** ТУ. Поставлено **29** водогрійних котлів загальною потужністю 47 МВт до Великобританії та **52** котли загальною потужністю 91 МВт до Франції. Загальна встановлена теплова потужність впровадженого обладнання склала **2299,8 МВт**, електрична - **16,8 МВт**. Сумарне виробництво теплової енергії склало **34381,5 тис. Гкал**, електричної - **169696,8 кВт·год**. Досягнуто сумарне заміщення природного газу - **4,2 млрд м<sup>3</sup>**, та скорочення викидів парникових газів - **8,6 млн т CO<sub>2</sub>-екв**. Розрахунковий економічний ефект (при вартості теплової енергії з газу 1400 грн/Гкал і вартості теплової енергії з біомаси на 10% дешевше, ніж з газу) - **4,813 млрд грн**.

## **Висновки**

1. Розроблено наукові засади виробництва і споживання альтернативних видів палива. Зокрема, розроблено методику оцінювання енергетичного потенціалу біомаси, придатної для енергетичного використання в Україні. Розроблено склад та режими виробництва композиційного біопалива з рослинної біомаси та торфу. Досліджено процес вигорання часток твердого біопалива (тирси та лушпиння соняшника) в потоці та проведено аналіз його залежності від їх вологості та фракційного складу. Виконано комплексний аналіз енергетичної та екологічної ефективності технологій виробництва теплової енергії з біомаси за весь період життєвого циклу проекту з використанням наступних показників: коефіцієнт перетворення енергії, питомі сукупні витрати енергії, скорочення викидів парникових газів. Розроблено комплексну методику та

проведені широкі експериментальні дослідження газоутворення на звалищах та полігонах України.

2. Розроблено комплекс технологій для виробництва і споживання альтернативних видів палива. Зокрема, розроблено інноваційну ресурсозберігаючу технологію комплексної переробки торфу на композиційне паливо та гумінові добрива. Розроблено технологію ефективного спалювання низькоякісних видів біопалива в топках з ретортною подачею палива і решітками допалювання. Розроблено технологію заміщення природного газу біомасою у великих обертових печах. Розроблено технології спалювання твердого біопалива вологістю до 55% на рухомих колосникових решітках. Визначено оптимальні режими роботи газозбірних свердловин, при яких досягаються максимальні ефективність збору біогазу та скорочення емісій парникових газів.
3. Розроблені технології і обладнання широко впроваджені в Україні і за кордоном. За період 2000-2019 рр. загальна встановлена теплова потужність впровадженого обладнання склала **2299,8 МВт**, електрична - **16,8 МВт**. Досягнуто сумарне заміщення природного газу - **4,2 млрд м<sup>3</sup>**, та скорочення викидів парникових газів - **8,6 млн т CO<sub>2</sub>-екв.** Розрахунковий економічний ефект склав **4,813 млрд грн.**

Кількість публікацій за роботою: **231**, включаючи **10** монографій, у т.ч. **1** видану за кордоном, **25** посібників, **177** наукових статей, у т.ч. **11** публікацій у Scopus, **1** - у Web of Science. Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи: Google Scholar – **2513/30**, Scopus – **23/4**, Web of Science – **3/2**. Отримано **25** патентів України на винахід. Захищено **2** докторські та **6** кандидатських дисертацій.



Гелетука Г.Г



П'яних К.Є.



Петрова Ж.О.



Крігер Л.Ф.



Корінчук Д.М.



Савчук С.Д.



Железна Т.А.



Понікарчук А.М.