

РОЗВИТОК РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ СТРУМЕНЕВО-ВИХРОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ-УТИЛІЗАТОРІВ

***В. С. Федорейко, доктор технічних наук, професор,
директор Центру енергоефективних технологій ТНПУ ім. В. Гнатюка
Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира
Гнатюка***

E-mail: kaf_mki@tnpu.edu.ua

Анотація. У статті проаналізовано шляхи трансформації енергетичної системи України на основі концепції «Smart Grid» з впровадженням проєктів розподіленої генерації. Обґрунтовано доцільність використання нових інструментів децентралізації джерел теплової і електричної енергії, як складової частини малої енергетики, орієнтованої на відновлювальні види несертифікованого біопалива місцевого походження. Доведено енергетичну, економічну, екологічну та соціальну значимість впровадження систем термохімічної деструкції біовідходів за допомогою струменево-вихрових генераторів-утилізаторів в енергоємних технологіях.

Запропоновано нові підходи до процесу генерації теплової енергії в енергоємних процесах агропромислового комплексу на прикладі сушіння зернових культур. Розроблені теплотехнічні засоби термохімічної деструкції біовідходів, системи теплообміну та утилізації продуктів згорання. Проведений повний цикл виробничих випробувань автоматизованих струменево-вихрових генераторів-утилізаторів з урахуванням недетермінованих технологічних параметрів (температура, вологість, продуктивність, фізико-хімічних властивості палива).

Вартість теплової енергії в технологічних процесах сушіння зерна в 5...7 разів менша за традиційну вуглеводневу. Враховуючи наявність функціонального теплообмінника, процес сушіння відбувається підігрітим чистим повітрям, що позитивно впливає на якісні показники зерна.

Зважаючи на виклики, що існують в електроенергетиці України, запропоновано проєкт когенераційної установки на базі генератора-утилізатора та повітряної турбіни, яка за допомогою теплообмінника і компресора перетворює частину теплової енергії в механічну. За допомогою електромашинного перетворювача відбувається продукування електроенергії, яка задовільняє потреби теплотехнічного модуля установки. Сумарний коефіцієнт корисної дії когенераційної установки складає близько 80 %.

Ключові слова: термохімічна деструкція, струменево-вихровий генератор-утилізатор, несертифіковане біопаливо, децентралізація, тепла та

електрична енергія, відновлювальні джерела, диверсифікація, розподілена генерація, віртуальна генерація, теплообмінник, компресор, турбіна, когенерація

Актуальність. У силу об'єктивних і суб'єктивних причин, пов'язаних із зовнішньою агресією, вітчизняна енергетична галузь входить в зону функціональної турбулентності. Загальновідомо, що споживання енергії в нашій країні вимагає створення нових генеруючих структур, глибокої трансформації галузі на основі концепції «Smart Grid» із впровадженням проєктів розподільної генерації. Саме децентралізація енергетичних структур на основі розширення ролі зеленої відновлювальної енергії дасть змогу адаптувати галузь під нові виклики. Переорієнтація генерації на сонячну, вітрову та біоенергію дозволить цивілізовано диверсифікувати джерела, поступово витісняючи традиційно фатальні для країни вуглеводневі види палива. Україна повинна покинути зону енергомарнотратства в першу чергу за рахунок раціонального використання наявних в державі ресурсів. Це, насамперед, стосується використання біоенергії, запаси якої у відновлювальному річному циклі прирівнюються до більш ніж 10 млрд. метрів кубічних природного газу. На жаль, нині це ресурс, який з причини корупційно-політичних традицій практично не задіяний. Тільки впровадження нових підходів та інструментів у галузі диверсифікації джерел енергії може дати практичний результат по цивілізованій реструктуризації енергобалансу нашої країни.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Створена в середині минулого століття централізована система організації та управління енергосистемою України проходить в даний час випробування на здатність на подальше існування. Все більше фахових експертів говорить про необхідність її кардинальної трансформації з урахуванням сучасних викликів та значного підвищення якості генерації, трансформації, передачі та розподілу енергетичних потоків. Це стосується як електро- так і теплогенерації. Ще на початку двотисячних професор національного університету «Київський політехнічний інститут» Артур Праховник [1] та професор Національного університету біоресурсів і природокористування України Микола Корчемний [2] просували ідею трансформації енергетики нашої держави на основі впровадження проєктів розподільної генерації, як елементів концепції «Smart Grid»,

яка передбачає в себе системну модернізацію галузі, включаючи всі її складові – генерацію, передачу, розподіл, збут та диспетчеризацію. Вказані проєкти – це будівництво джерел електричної та теплової енергії незалежними виробниками або споживачами для власних потреб з можливістю перенаправлення надлишків в мережу централізованого електропостачання. Стимулюючим фактором розвитку проєктів є диверсифікація паливних ресурсів за рахунок збільшення частки альтернативних, у тому числі місцевого походження джерел енергії.

На основі засобів розподільної генерації може створюватися нова енергетична інфраструктура держави з регіональною юрисдикцією. Створення і експлуатація об'єктів такої енергетики вимагає значно менших затрат порівняно з дороговартісною великою генерацією, а також значно зменшить навантаження на розподіл і передачу енергії. Адже існуючі нині реальні втрати при передачі та розподілі значно перевищують нормативні, що призводить до регулярного підвищення тарифів. Наближення генерації до споживачів вирішує одночасно цілий ряд проблем технічного, економічного та екологічного характеру. Особливо це характерно для ситуації, коли виробництво і споживання знаходяться в одному юридичному полі, що унеможлиблює традиційні конфлікти інтересів [1]. Це, в свою чергу, є значним стимулом для створення в майбутньому передумов розвитку віртуальної генерації, яка замінить архаїчну централізовану енергетичну систему [3].

Описані тенденції є світовим трендом і направлені на реалізацію стратегії глобальної перебудови енергетики по концепції «Smart Grid».

Починаючи з 2022 року, завдяки далекоглядній політиці урядів розвинутих економік спостерігається масштабний розвиток відновлювальної енергетики з одночасною стагнацією традиційних, у першу чергу, вуглеводневих джерел енергії. Це призведе до модернізації і реформування економік у країнах, які усвідомлюють незворотність зазначених процесів.

Поряд із розвитком сонячної, вітрової та гідроенергетики в сегменті «зеленої» енергії прискорений розвиток отримає біоресурсна та утилізаційна енергетика, яка напряму пов'язана з екологічним станом довкілля. Останній із окреслених напрямів

має надзвичайне значення для нашої держави. Україна приречена цивілізувати власну економіку і забути про світове лідерство в царині марнотратства природних ресурсів, адже наша держава щорічно в АПК продукує агротехнічно доступні біовідходи (солома, насіннєві та елеваторні відходи) в обсязі 23...25 млн. тонн. В енергоеквіваленті це понад 10 млрд. м³ природного газу. Це об'єм адекватний щорічному імпорту фатального для нашої держави вуглеводневого палива. Нині в Україні функціонує орієнтовно 30 тисяч сміттєзвалищ. Щорічно накопичується 5...7 млн. тонн відходів, що стає причиною численних техногенних катастроф. Досвід країн Євросоюзу показує, що вказані ресурси можуть стати суттєвим додатком до енергетичного балансу країни [3].

Отриманий статус кандидата на вступ до Євросоюзу зобов'язує Україну йти чітким цивілізаційним шляхом, стимулюючи розвиток відновлювальної енергетики в системах локальної розподіленої генерації, націленої на видалення природного газу з енергоємних технологічних процесів.

Загальновідомо, що Україна займає одне з останніх місць в системі генерації тепла з біопалива. У 2015 р., за даними Державної служби статистики України, структура загального первинного постачання енергії характеризувалася значною часткою природного газу (28,9 %, 26 млн. т н.е.), тоді, як біомаса, паливо та відходи становили лише 2,2 % (2 млн. т н.е.). У той же час країни Європи (зокрема Данія, Литва, Швеція) перейшли 20 % відмітку у цій галузі [4].

У новій Енергетичній стратегії України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» від 18 серпня 2017 р., яка окреслює стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України на вказаний період, визначено обсяг використання відновлювальних ресурсів на рівні 25 %, у тому числі біомаси, біопалива та відходів – 11,5 %. Таким чином, реалізація запропонованого нами дослідження є невід'ємною складовою енергетичної стратегії України [4].

Мета дослідження – розкриття шляхів трансформації енергетики України шляхом створення структур розподіленої генерації теплової та електричної енергії

на базі струменево-вихрових генераторів-утилізаторів, що працюють на несертифікованому біопаливі місцевого походження.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження проводилися з використанням теоретичних та експериментальних методів, заснованих на: фактологічному аналізі раціональних систем генерації відновлювальної енергії в розподіленій генерації; методі термохімічної деструкції біопалива в камері згорання для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу; методах перетворення теплової енергії отриманої із біопалива з нестабільними фізико-механічними характеристиками в електричну; методах економічного аналізу для визначення основних показників технології сушіння зерна.

Результати досліджень та їх обговорення. Для впровадження енергоефективних технологій генерації теплової енергії ми пропонуємо використовувати технології на базі струменево-вихрових генераторів-утилізаторів, в яких відбувається термохімічна деструкція біопалива. Використання розроблених нами когенераційних установок на базі запропонованої технології є перспективним напрямком, що дозволяє вирішувати одночасно два взаємозалежних завдання: підвищення енергоефективності теплогенерації та екологічно безпечної утилізації біовідходів у агропромисловому секторі, зокрема в процесі сушіння зерна.

Сушіння зернових культур є найенергоємнішим сезонним технологічним процесом в агропромисловому комплексі. На це витрачається близько 1 млрд м³ природного газу, а також пічне та дизельне паливо, використання яких призводить до різкого збільшення вартості продукції, що є однією з основних експортних статей фінансових надходжень до бюджету держави.

Наші дослідження свідчать, що заміна традиційного палива на відновлювальні біологічні відходи місцевого походження сприяє кардинальному зменшенню споживання природного газу, створює практично нульове навантаження на довкілля, а також забезпечує створення додаткових робочих місць [5].

Нами доведено, що 2,5–3,0 т несертифікованого палива з біовідходів заміщає 1000 м³ природного газу. Утилізуючи 2,5–3,0 тонни відходів, вартістю 1400–1600 грн/т з урахуванням логістичних, експлуатаційних і зарплатних витрат, отримуємо

ціну теплової енергії в 5...7 разів дешевшої від традиційної вуглеводневої (при сьогоднішніх цінах) [4].

При таких техніко-економічних показниках термін окупності автоматизованого теплогенераторного комплексу не перевищує 3...4 місяці і в даний час є найперспективнішим інвестиційним проєктом у галузі енергетичного машинобудування. Це на 100 % український продукт. Метал, термобетон, електродвигуни, контролери, програмне забезпечення, пускорегулювальна апаратура вироблені в Україні. При серійному виробництві це стимулюватиме розвиток суміжних галузей економіки.



Рис. 1. Генератор-утилізатор потужністю 3 МВт

Допоміжні технологічні процеси, пов'язані із заготівлею, підготовкою та подачею біопалива в теплогенератор, дають змогу створити додаткові робочі місця.

Таким чином, створена нами повністю автоматизована технологія термохімічної деструкції несертифікованого біопалива місцевого походження дозволяє:

- використовувати для генерації теплової енергії біовідходи з однорічним циклом відновлення без попередньої підготовки вологістю до 50 %, 2...3 річним терміном зберігання;

– завдяки інноваційному двоступінчатому дозуванню та струменево-вихровому способу подачі палива в топку отримати діапазон плавного регулювання потужності генератора в діапазоні $0,25-1,0 P_n$;

– отримувати чисте підігріте повітря з точністю регулювання $1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в широкому діапазоні від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дає змогу адаптації комплексу до всіх існуючих сушарок.

Проведені нами дослідження засвідчили, що перспективним напрямом у даному випадку є впровадження когенераційних технологій, які широко використовуються в малій енергетиці, що зумовлено такими перевагами. По-перше, тепло використовується безпосередньо в місці отримання, що значно дешевше, ніж будівництво та експлуатація багатокілометрових теплотрас. По-друге, електроенергія використовується здебільшого в місці отримання без накладних витрат постачальників енергії, тому її вартість для споживача може бути дещо дешевшою, ніж енергія з мережі. Адже часто через зношеність обладнання існуючих електромереж ускладнено підключення нових промислових споживачів, а іноді й просто економічно недоцільно (у випадку значного віддалення споживача від лінії електропередачі). Крім того, зменшення теплових викидів в атмосферу сприяє вирішенню екологічних проблем [6].

У результаті застосування автономних енергоджерел із комбінованим виробництвом електричної і теплової енергії (когенерація) забезпечується певний енергетичний резерв у централізованій системі. Тому можливість використання теплових відходів у рекупераційному виробничому процесі як джерела отримання електричної енергії є важливим завданням, реалізувати яке можна використавши термоелектричні перетворювачі енергії [7].

Отримавши в результаті багаторічних досліджень ефективний інструмент генерації дешевої теплової енергії з несертифікованого біопалива місцевого походження, нами взята за основу концепція перетворення теплової енергії в електричну, яка запропонована професором Андрієм Русановим – директором Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків).

Електромашинну частину проєкту готова реалізувати команда професора Олександра Бешти з Дніпровської політехніки.

Проведено аналіз та встановлено, що для перетворення теплової енергії, отриманої із біопалива з нестабільними технічними характеристиками в механічну (електричну) енергію відносно невеликої потужності (до 1 МВт), найбільш прийнятною є енергетична установка з повітряною (газовою) турбіною з виносним теплообмінником (замість камери спалювання), що працює на термічному циклі Брайтона [8].

Переваги:

- на відміну від парових турбін та турбін на низькикипаючих робочих тілах використовується набагато менше теплофікаційного обладнання;
- на відміну від класичних газових турбін та ДВС не потребують якісного палива;
- при відносній простоті можливість досягти високу енергетичну ефективність;
- дозволяє ефективне використання в когенераційних установках.

На рис. 2 зображено загальну схему когенераційної енергетичної установки розробленої в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України.

В цій схемі енергетична установка виконує дві функції: генерує електричну енергію та тепло для сушіння зерна. Повітря яке виходить з турбіни має високу температуру (точка 4), воно спрямовується у змішувач, де змішується з холодним атмосферним повітрям (точка 5) у пропорції, яка забезпечить необхідну температуру суміші на виході зі змішувача (точка 6). Повітря до теплового генератора подається з атмосфери (точка 0).

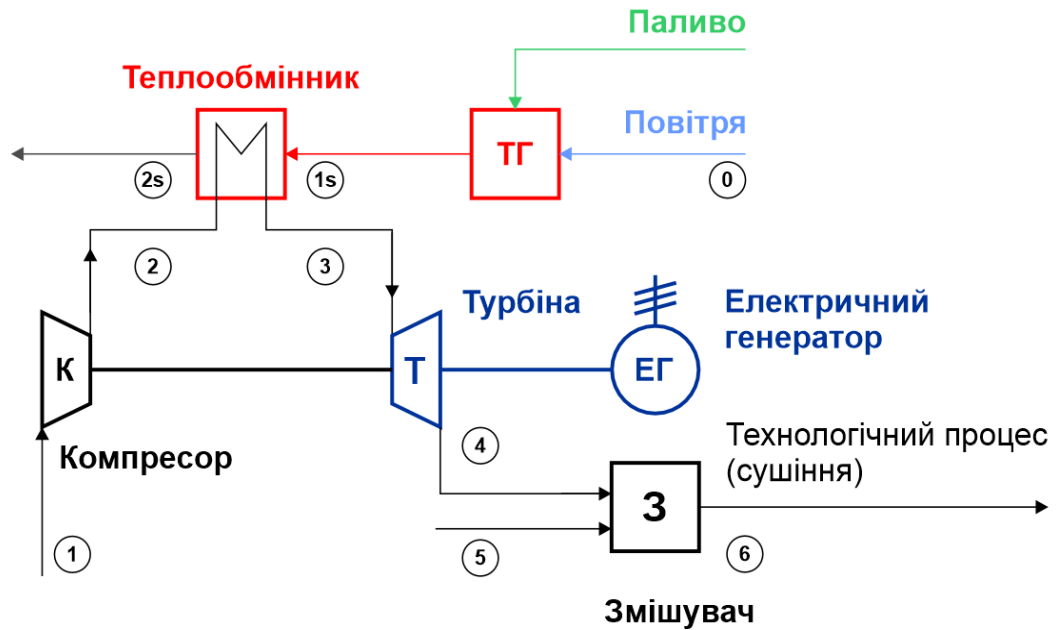


Рис.2. Загальна схема когенераційної енергетичної установки

Продукти спалювання з теплового генератора подаються на вхід теплообмінника (точка 1s) для нагрівання повітря, що надходить з компресора. З точки зору збільшення загального ККД когенераційної установки, температуру у точці 1s необхідно максимально збільшувати, а у точці 2s максимально зменшувати. При заданих параметрах повітряної турбіни, в разі значення температури в точці 1s на рівні 1000 °С, температури у точці 2s в діапазоні 200~250°С, до ТГ буде підводитись теплова потужність 1600~1800 кВт, з яких 100 кВт буде перетворено у механічну (електричну) енергію, 1200~1300 кВт буде використано на сушіння зерна (точка 6), а 300~400 кВт буде втрачено за рахунок викиду в атмосферу гарячих газів (точка 2s). Термічний ККД установки може досягати 80 %. Теплообмінник необхідно проектувати, виходячи із забезпечення характеристик турбіни, обраних значень температур у точках 1s та 2s, а також необхідної масової витрати димових газів.

Таким чином, використання розробленої когенераційної енергетичної установки дозволяє отримувати дешеву електроенергію, яка необхідна для функціонування генератора-утилізатора. Це дає змогу створити енергоавтономний

комплекс для забезпечення технологічного процесу сушіння зерна, або інших теплотехнічних функцій.

Висновки і перспективи.

1. Фактологічно доказано перспективність використання технологій термохімічної деструкції несертифікованого біопалива місцевого походження для генерації дешевої теплової та електричної енергії для реалізації проєктів розподільної генерації.

2. Обґрунтовано доцільність використання біоенергії, як стабілізуючої ланки малої енергетики поряд з метеорологічнозалежними сонячними та вітровими системами генерації.

3. Запропоновано новий інструмент отримання відновлювальної чистої теплової енергії – струменево-вихровий генератор-утилізатор, впровадження якого дозволить отримати значний енергетичний, економічний, екологічний та соціальний ефекти. Термін окупності розробки не перевищує 3...4 місяці.

Список використаних джерел

1. Праховник А. В., Попов В. А., Ярмолюк Е. С., Кокоріна М. Т. Перспективи і шляхи розвитку розподільної генерації в Україні. Збірник Київського політехнічного інституту, 2012. №2 . С. 7–14.

2. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Монографія. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 192 с.

3. Федорейко В. С., Іскерський І. С. Децентралізовані системи генерації теплової та електричної енергії в біоресурсних технологіях. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». К.: НУБіП України, 2017. Вип. 261. С. 52–56.

4. Федорейко В. С. та ін. Технології біоресурсної диверсифікації джерел енергії на базі генераторів-утилізаторів. Монографія. Тернопіль: Редакційно-видавничий відділ ТНПУ імені Володимира Гнатюка, 2022. 288 с.

5. Федорейко В. С., Лучко М. Р., Іскерський І. С., Загородній Р. І. Підвищення ефективності біотвердопаливних систем генерації енергії: технічний та економічний аспекти. Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпро : НГУ, 2019. № 2. С. 94–100.

6. Федорейко В. С., Рутило М. І., Луцик І. Б., Загородній Р. І. Моделювання електрогенеруючого блоку когенераційної системи теплогенератора. Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпропетровськ : НГУ, 2017. № 2. С. 87–92.

7. Fedoreyiko V. S., Iskerskyi I. S., Zagorodniy R. I., Rutylo M. I. Optimization of heat production processes in the biofuel vortex combustion system. *Naukovyi Visnyk NHU*, 2020. № 6. P. 83–88.

8. Rusanov A. V., Kostikov A. O., Shubenko O. L., Kharlampidi D. Kh., Tarasova V. O., Senetskyi O. V.. Highly Efficient Cogeneration Power Plant with Deep Regeneration Based on Air Brayton Cycleimpellers *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 22, No. 4. P. 12 –23.

References

1. Prakhovnyk, A. V., Popov, V. A., Yarmoliuk, E. S., Kokorina, M. T. (2012). *Perspektyvy i shliakhy rozvytku rozpodilnoi heneratsii v Ukraini* [Prospects and ways of development of distribution generation in Ukraine]. *Zbirnyk Kyivskoho politekhnichnoho instytutu*, 2, 7–14.

2. Korchemnyi, M., Fedoreyiko, V., Shcherban, V. (2001). *Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi. Monohrafiia*. [Energy conservation in the agro-industrial complex]. Ternopil: Pidruchnyky i posibnyky, 192.

3. Fedoreyiko, V. S., Iskerskyi, I. S. (2017). *Detsentralizovani systemy heneratsii teplovoi ta elektrychnoi enerhii v bioresursnykh tekhnolohiiakh* [Decentralized heat and electric energy generation systems in bioresource technologies]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia «Tekhnika ta enerhetyka APK»*. K.: NUBiP Ukrainy, 261, 52–56.

4. Fedoreyiko V. S. ta in. (2022). *Tekhnolohii bioresursnoi dyversyfikatsii dzherel enerhii na bazi heneratoriv-utylizatoriv. Monohrafiia*. [Technologies of bioresource diversification of energy sources based on generators-utilizers]. Ternopil: Redaktsiino-vydavnychiy viddil TNPU imeni Volodymyra Hnatiuka, 288.

5. Fedoreyiko V. S., Luchko M. R., Iskerskyi I. S., Zahorodniy R. I. (2019). *Pidvyshchennia efektyvnosti biotverdopalyvnykh system heneratsii enerhii: tekhnichniy ta ekonomichnyi aspekty* [Enhancing the efficiency of energy generation systems based on solid biofuels: technical and economic aspects]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. Dnipro: NHU, 2, 94–100.

6. Fedoreyiko, V. S., Rutylo, M. I., Lutsyk, I. B., Zahorodniy, R. I. (2017). *Modeliuvannia elektroheneruiuchoho bloku koheneratsiinoi systemy teploheneratora*. [Modeling of the power generating unit of the cogeneration system of the heat generator]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. Dnipropetrovsk: NHU, 2, 87–92.

7. Fedoreyiko, V. S., Iskerskyi, I. S., Zagorodniy, R. I., Rutylo, M. I. (2020). Optimization of heat production processes in the biofuel vortex combustion system. *Naukovyi Visnyk NHU*, 6, 83–88.

8. Rusanov, A. V., Kostikov, A. O., Shubenko, O. L., Kharlampidi, D. Kh., Tarasova, V. O., Senetskyi, O. V. (2019). Highly Efficient Cogeneration Power Plant with Deep Regeneration Based on Air Brayton Cycleimpellers *Journal of Mechanical Engineering*, 22 (4), 12 –23.

DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION OF HEAT AND ELECTRIC ENERGY BASED ON EDDY CURRENT GENERATORS-UTILIZERS

V. Fedoreyiko

Abstract. *The article analyzes ways of transforming Ukraine's energy system based on the "Smart Grid" concept with the implementation of distributed generation projects. The expediency of using new tools for the decentralization of thermal and electrical energy sources as a component of small-scale energy, focused on renewable types of uncertified biofuel of local origin, is substantiated. The energy, economic, ecological and social significance of the introduction of systems of thermochemical destruction of bio-waste with the help of jet-vortex generators-utilizers in energy-intensive technologies has been proven.*

New approaches to the process of heat energy generation in energy-intensive processes of the agro-industrial complex are proposed using the example of grain drying. Thermal engineering means of thermochemical destruction of biowaste, heat exchange system and disposal of combustion products have been developed. A full cycle of production tests of automated jet-vortex generators-utilizers was carried out, taking into account non-deterministic technological parameters (temperature, humidity, productivity, physico-chemical properties of fuel).

The cost of thermal energy in technological processes of grain drying is 5...7 times lower than traditional hydrocarbon. Given the presence of a functional heat exchanger, the drying process takes place with heated clean air, which has a positive effect on the quality indicators of the grain.

Taking into account the challenges that exist in the electric power industry of Ukraine, a project of a cogeneration plant based on a generator-utilizer and an air turbine is proposed, which, with the help of a heat exchanger and a compressor, converts part of the thermal energy into mechanical energy. With the help of an electric machine converter, electricity is produced, which meets the needs of the heat engineering module of the installation. The total efficiency of the cogeneration plant is about 80 %.

Key words: *thermochemical destruction, jet-vortex generator-utilizer, uncertified biofuel, decentralization, heat and electric energy, renewable sources, diversification, distributed generation, virtual generation, heat exchanger, compressor, turbine, cogeneration*