

УДК 621. 311

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.049>

ТВЕРДІ ПОБУТОВІ ВІДХОДИ ЯК ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕСУРС

І.М. Карп, академік НАН України, **К.Є. П'яних**, докт.техн.наук

Інститут газу НАН України,

вул. Дегтярівська, 39, Київ, 03113, Україна,

e-mail: karpkiev@gmail.com, pvanvkh@gmail.com

Проаналізовано технологічні аспекти енергетичного використання твердих побутових відходів та можливості застосування деяких технологій в Україні. За умови часткового сортування відходів можна використати для виробництва енергії половину їхнього потенціалу, що для України оцінюється в еквіваленті природного газу у 1,5 млрд. м³. Частка харчових відходів близька до 40%. Їх доцільно переробляти у сумішах з відходами сільськогосподарської діяльності та енергетичними рослинами у біогаз та біометан. Виробництво електричної та теплової енергії з біогазу потребує державної підтримки через введення спеціальних тарифів. Набуває поширення використання біометану поряд з природним газом у стисненому і зрідженому станах у транспортній енергетиці. Біогазові комплекси використовують як балансуєчі потужності електромереж. Найбільш поширеною технологією використання енергетичного потенціалу твердих побутових відходів є спалювання. Системи очищення викидних газів сміттєспалювальних заводів досягли ступеня досконалості, який дає можливість розміщувати їх впритул до житлових масивів. Бібл. 17, табл. 2.

Ключові слова: тверді побутові відходи, харчові відходи, біометан, спалювання.

Стан проблеми поводження з відходами. Енергетичне використання твердих побутових відходів (ТПВ) в Україні відповідає одному з основних завдань «Нової енергетичної стратегії України на період до 2035 року», а саме, зменшенню залежності держави від імпорту первинних енергетичних ресурсів [1]. Автори статті повні розуміння того, що єдиного рішення щодо технології утилізації ТПВ для кожного міста або регіону не існує. Тому **мета статті** – на основі вивчення міжнародного досвіду запропонувати найкраще технологічне рішення енергетичної утилізації ТПВ, придатне для умов України, можливість його застосування з урахуванням економічної стратегії держави та існуючого законодавства, розробити і спрямувати керівним органам держави відповідні рекомендації.

У 2017 році прийнято «Національну стратегію управління відходами до 2030 року» [2], в якій зазначається, що в Україні функціонує 460 міст, близько 500 районів, 885 селищ міського типу і 28388 сіл. Обсяги утворення твердих побутових відходів 2016 року становили 49 млн. куб. метрів або близько 11 млн. тонн (без урахування тимчасово окупованих територій, Автономної Республіки Крим та м. Севастополя). Незважаючи на те, що протягом останніх 20 років чисельність населення України постійно скорочується, обсяги утворення побутових відходів мають тенденцію до зростання і в середньому становлять 250–300 кг/рік на одну людину. Стратегія покладає відповідальність за організацію послуг щодо поводження з ТПВ на органи місцевого самоврядування.

Слід зазначити, що державний облік та статистика щодо обліку побутових відходів в Україні мають суттєві недоліки. У статистичній звітності та нормативно-правових актах щодо поводження з побутовими відходами оперують як об'ємними, так і ваговими категоріями. Перерахунок одних одиниць в інші призводить до значних похибок під час проведеної оцінки, прогнозів тощо.

Домінуючим способом поводження з побутовими відходами в Україні залишається їхнє вивезення та захоронення на полігонах та сміттєзвалищах. У 2016 році лише 5,8 відсотка утворених побутових відходів перероблено, в тому числі 2,71 відсотка (1,3 млн. куб. метрів) утилізовано (спалено), 3,09 відсотка (1,53 млн. куб. метрів) спрямовано на інші сміттєпереробні комплекси та близько 0,003 відсотка (2000 куб. метрів) компостовано. Решту (близько 94 відсотків) розміщено на полігонах та сміттєзвалищах, яких станом на 2016 рік в Україні налічувалося 5470 одиниць, з них 305 (5,6 відсотка) перевантажені, а 1646 (30 відсотків) не відповідають нормам екологічної безпеки. За експертними оцінками більше 99 відсотків функціонуючих полігонів не відповідають європейським вимогам

(Директиві Ради № 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 р. «Про захоронення відходів»). Як правило, внаслідок недостатнього рівня контролю або відсутності належної системи поводження з побутовими відходами за офіційними даними щороку утворюється понад 27 тис. несанкціонованих сміттєзвалищ. За даними Держстату їхня площа становить 12 тис. кв. км.

Поводження з відходами в Україні порівняно з ЄС у цілому та двома країнами Європи у 2015 році демонструє табл. 1, підготовлена А. Войціховською, членом міжнародної неурядової організації «Екологія. Право. Людина» [3].

Таблиця 1

Поводження з побутовими відходами	Україна, дані Мінрегіону України, млн. т*	Країни ЄС, дані Євростату, млн. т	Швеція, дані Євростату, млн. т	Польща, дані Євростату, млн. т
Всього утворено відходів	9,23	194	4,377	10,863
Захоронення, видалення	8,69 (94,07%)	61 (31,4%)	0,035 (0,8%)	4,808 (44,3%)
Спалювання	0,25 (2,73%)	64 (33,0%)	2,241 (51,2%)	1,439 (13,2%)
Перероблення	0,3 (3,2%)	69 (35,6%)	2,101 (48%)	4,616 (42,5%)

* з коригуванням за розрахунками Омеляненко Т.Л., http://nowaste.com.ua/wp-content/uploads/2016/11/Omelianenko_SHV_forum.pdf

Як видно з таблиці, з точки зору енергетичного використання ТПВ прикладом може слугувати Швеція, де спалюється близько 50% цих відходів. Аналогічно в Україні можна було би використати як первинне паливо приблизно 4,5 млн. т ТПВ, що відповідає 1,28 млн. т умовного палива (теплотворна спроможність ТПВ прийнята 2000 ккал/кг або 8,36 МДж/кг). Оскільки в містах для опалення використовується в основному природний газ, спалювання такої кількості ТПВ могло би замінити або вивільнити для інших потреб 1,5 млрд.м³ газу на рік. Наведені оцінки справедливі за умови організованого збору та сортування сміття у разі відсутності несанкціонованих звалищ.

Важливим компонентом системи управління відходами та їхньої утилізації є законодавча база. В Україні основним регулюючим документом щодо поводження з відходами є закон «Про відходи», прийнятий ще у 1998 році [4]. Законодавство доповнює низка законів щодо конкретних видів відходів: радіоактивних, хімічних джерел струму, ветеринарних, металобрухту, Кодекс України про надра та інші нормативно-правові акти. Доповненням до Закону «Про відходи» у 2017 році Верховна Рада України зобов'язала органи місцевого самоврядування запровадити з 1 січня 2018 року сортування всього сміття, але ця норма закону не виконується через відсутність необхідної інфраструктури та зацікавленості суб'єктів господарювання.

Наведені дані характеризують стан проблеми в цілому, проте не є дороговказом у виборі технічних та організаційних рішень щодо поводження з відходами в Україні. Прийняття рішень про поводження з ТПВ є складною проблемою і повинно враховувати багато факторів. До основних факторів належить пріоритетний напрямок утилізації – енергетичний або санітарний, економічний стан держави, рівень життя населення, тобто його можливість оплачувати технологічний процес утилізації відходів від збирання до перероблення, знешкодження та захоронення залишків, кліматичні умови в регіоні, характерний для даного міста або регіону склад відходів та їхній обсяг.

Розглядаючи проблему енергетичного використання відходів в Україні, необхідно вирішити низку задач, необхідних як для вибору технологій утилізації, так і організації попередньої підготовки для утилізації та транспортування. Необхідно визначити кількість відходів для даного міста, поселення або регіону, оцінити частку відходів, яка може бути використана як енергетична сировина, який склад відходів найбільш характерний для даного міста або місцевості, дослідити їхню густину та фракційний склад. Принципово важливим питанням є вирішення питання щодо доцільності переважного будівництва одиничних підприємств великої потужності чи розділення процесу утилізації на ряд відносно невеликих потужностей з урахуванням транспортних витрат та наявності територій для їхнього розміщення. Необхідно визначити цілеспрямованість енергетичного використання – на отримання переважно електричної або теплової енергії або іншого виду палива: біогазу, біометану, іншого газоподібного – генераторного або синтез-газу, рідкого у вигляді важкого котельно-пічного палива або твердого у вигляді пелет RDF (Refuse Derived Fuel).

Використання частки відходів як енергетичної сировини. Тверді побутові відходи, частка яких може бути використана як енергетичний ресурс, утворюються, в основному, в містах та селищах міського типу. Виробником ТПВ є як житловий сектор, так і бюджетні, торговельні та комунальні

установи. Середній обсяг утворення відходів в Україні на одну людину становить 250–300 кг/рік, але він може суттєво відрізнятись від середнього значення як в один, так і в інший бік.

Спираючися на дані Євростату, європейська торговельна асоціація постачальників технологій «Відходи в енергію» (European Suppliers of Waste-to-Energy Technology (ESWET)) відзначає тенденцію країн-членів ЄС до збільшення до 2030 року частки рециклінгу ТПВ до 65%, а частку захоронення зменшити до 10%. Ця тенденція особливо помітна в Естонії, Литві та Фінляндії, де створюються нові потужності для перероблення та енергетичного використання ТПВ. Одночасно зазначається, що в таких країнах як Болгарія, Кіпр, Хорватія, Чехія, Греція, Угорщина, Латвія, Португалія, Румунія та Іспанія резерв перероблення ТПВ значний, оскільки 40% ТПВ відправляється на звалища [5]. У роботі [6] із посиланням на [7] наведено усереднений склад відходів для України, табл. 2. З таблиці видно, що частка горючих відходів (без харчових) становить 37,8%. Таким чином, частку ТПВ, яка може бути спрямована для отримання енергетичних продуктів, можна вважати у межах 30–50% від загальної кількості.

Таблиця 2

Відходи	Маса, %
Харчові відходи	36,1
Папір та картон	14,3
Садові (зелені) відходи	9,8
Деревина	1,9
Гума, шкіра, кістки, солома	2,2
Тканина	3,4
Пластмаса	5,8
Інші органічні відходи	0,4
Метал	2,3
Будівельні матеріали	3,6
Скло та кераміка	6,2
Інші неорганічні відходи	14,0

Енергетичне використання харчових відходів.

Частка харчових відходів порівнянна з часткою горючих відходів, її енергетичний потенціал достатньо великий, але в Україні не використовується. Суть технологій енергетичного використання харчових та/або змішаних відходів полягає у їхній ферментації з виробництвом біогазу. Біогаз складається в основному з метану CH_4 та оксиду вуглецю CO_2 у співвідношенні близько 50:50. Після видалення з біогазу CO_2 залишається газ із вмістом метану більше 90%, близьким до складу природного газу. Такий газ називають біометаном або іноді «відновленим природним газом». Слід взяти до уваги, що на практиці у разі переміщення технологічного обладнання за межі міст, до харчових відходів приєднують відходи сільсько-

го господарства та спеціально вирощені енергетичні рослини. Наведена далі щодо виробництва біогазу та біометану інформація в більшості отримана за матеріалами консалтингової компанії «Акорд» [8].

Потреба в анаеробній ферментації харчових та змішаних відходів у майбутній круговій економіці буде зберігатися і навіть зростати. Вона є наріжним каменем менеджменту відходів і кругообігу біомаси, а також циркуляції поживних речовин. Крім того, це поновлюване джерело енергії (біогаз) здатне забезпечувати не лише базове навантаження електромереж, але і гнучкий баланс між попитом і пропозицією.

Звіт Європейської біогазової асоціації показав, що кількість біогазових комплексів у Європі за останнє десятиріччя стабільно зростала і у 2017 році досягла 17783 одиниці; кількість заводів із виробництва біометану сягнула 540. Загальна встановлена потужність біокомплексів склала 10,53 ГВт, а обсяг виробленої з неї електроенергії становив 65179 ГВт*г. У 2017 році виробництво біометану здійснювалося у 15 європейських країнах; у 2018 році до них приєдналися Бельгія, Естонія та Ірландія. Наразі сектор зазнає зрушення щодо кінцевого продукту в бік «відновленого природного газу», причому це стосується як діючих комплексів, так і тих, що будуються.

Кількість біогазових станцій у Німеччині становила у 2018 році 9494. Обсяг виробництва біогазу в Німеччині становить сьогодні біля 50% від усього обсягу, що виробляється в ЄС. Існують проблеми щодо зеленого тарифу та використання великої кількості площ під злакові культури для виробництва біогазу. Компанія з Нідерландів Bright Biomethane оголосила про початок будівництва першого заводу з виробництва біометану в Бельгії на базі існуючого біогазового комплексу, який буде доукомплектований обладнанням для виробництва біометану. Зараз комплекс щорічно переробляє 35000 тонн садових і харчових відходів місцевих домогосподарств. Замовником виступила компанія з управління відходами IOK Afvalbeheer.

Як повідомляє агентство Синьхуа, у Китаї освоєнням виробництва біогазу займається Китайська корпорація атомної енергетики CGN. Обсяг поставок біогазу в 2018 році мав скласти 500 млн. m^3 (за матеріалами news, gambler.ru).

За даними компанії Акорд Лтд вартість проекту з виробництва біогазу потужністю 1 МВт варіюється у межах 3–4 тис. євро за 1 кВт. Чим менша потужність біогазової станції, тим більша її

питома вартість. Вартість біогазового комплексу встановленою потужністю 5 МВт із додатковою системою доочищення біогазу до біометану становитиме 22–23 млн. євро. У випадку завантаженості 8000 год/рік він вироблятиме 9 млн. м³ біометану. (Неважко підрахувати, що при вартості метану 350 євро/тис. м³ прямий термін окупності комплексу становитиме 7 років). Для виробництва біометану нема потреби придбання концесії, відсутні рентні платежі, а сировиною можуть бути відходи і побічні продукти тваринництва та рослинництва, харчові відходи людської життєдіяльності.

У численних публікаціях підкреслюється, що виробництво електроенергії з біогазу та виробництво біометану для закачування у газові мережі повинно отримувати державну підтримку. Така підтримка здійснюється у всіх європейських країнах і в Україні. Так, у Великобританії діє так званий RHI-тариф, згідно з яким тариф на біометан становить 5,6 пенси за 1 кВт*г. За цим тарифом сплачуються перші 40 тис. МВт*г теплової енергії, що подається у вигляді біометану в газові мережі. Тариф встановлюється на період 20 років після початку роботи біогазового комплексу. В Україні тариф на електроенергію, отриману з біогазу, встановлено у розмірі 12,38 євроцент/кВт*г, що у два рази перевищує тариф для населення. Принагідно зазначимо, що зараз в Україні використовується 84 млн. м³ біометану на рік для виробництва електроенергії за зеленим тарифом. У Німеччині для виробництва електроенергії використовується 8,3 млрд. м³ біометану, а встановлена потужність генерації дорівнює 4 ГВт. Коефіцієнт використання встановлених потужностей теплових електростанцій, які споживають біогаз, становить 0,8, що значно перевищує цей показник для вітрових та сонячних потужностей. За останні 10 років Німеччина збільшила виробництво біометану у п'ять разів.

Використання біометану в транспортній енергетиці. Однак існує сектор економіки, в якому ефективність використання біометану достатньо висока для того, щоб уникнути субсидування. Таким сектором є транспортна енергетика, а саме використання біометану поряд з природним газом для заміщення ними рідких моторних палив. У Європі та ряді країн світу зростає інтерес до використання метану як моторного палива як з економічних, так і екологічних міркувань. Газ використовується як у стисненому, так і зрідженому стані. Використання стисненого (CNG- compressed natural gas, CBG – compressed biogas) або зрідженого природного газу або біометану (LNG, LBG – liquefied natural or biogas) є поширеним трендом останнього часу у транспортній енергетиці. У цьому секторі розроблені та впроваджуються об'ємні комплексні програми, які охоплюють декілька країн або великі регіони. Шведсько-фінська компанія «Gasum» створює систему використання зрідженого біометану та природного газу для міждержавних великовантажних перевезень у країнах північної Європи – Швеції, Фінляндії та Норвегії. Всього планується створення мережі з 50-ти заправок трейлерів зрідженим метаном. На початок 2018 року функціонувало 4 заправні станції, на 2018 рік було заплановано будівництво 10-ти та визначено місця запланованого будівництва ще 36 станцій LNG та LBG. Програма базується на таких перевагах використання газового палива, як технічна доступність, цінова конкурентоспроможність, екологічність – менші у порівнянні з дизельним паливом викиди твердих часток та оксидів азоту і вуглецю. Зазначаються конкурентні переваги також і перед великовантажним електротранспортом у зберіганні запасу енергії на борту транспортного засобу. Для зберігання енергії, еквівалентної 100 літрам дизельного палива, необхідно приблизно 3,5 т літій-іонних батарей (відповідно до щільності енергії батареї 280 Вт/кг). Вантажівки, що працюють на ринку LNG, здатні забезпечити пробіг більше 1600 км з обертовим моментом і силовими характеристиками, еквівалентними дизельному паливу.

За даними Європейської асоціації транспорту на природному газі (Natural Gas Vehicles Association Europe – NGVA) сьогодні в Європі на CNG працюють 16000 автобусів та 10000 вантажівок; 4000 вантажівок працюють на LNG. Транспорт на газі обслуговують 3525 заправок CNG- та 182 заправки LNG, з них 1270 – в Італії, 852 – у Німеччині, 182 – у Швеції. В Україні налічується близько 300 газонаповнювальних компресорних станцій та близько 20 тис. транспортних засобів на газі. У перспективі можна очікувати, що ця кількість буде збільшуватися за рахунок біометану у разі будівництва нових потужних біогазових заводів, де для виробництва біогазу будуть використовуватися поряд із сільськогосподарськими і харчові відходи міст та поселень.

Програма широкого використання метану як моторного палива на транспорті запроваджена у штаті Нью Джерсі, США. Відомі автобудівні компанії розробляють нові моделі цього типу транспортних засобів: фірма Volkswagen рекламує економічний легковий автомобіль на стисненому метані з витратою газу 4 м³/100 км; фірма Capstone (США) успішно випробувала рефрижератор із гібридним двигуном, що складається з газової мікротурбіни та літій-іонного акумулятора; компанія «Львівські автобусні заводи» (Україна) продемонструвала міський автобус на стисненому газі; є приклади вико-

ристання сільгосптехніки на стисненому метані. Компанія Ivesco визначає ключову роль природного газу та біометану в енергетичному переозброєнні транспортного сектора. Свою концепцію вони представили на відкритті нового заводу з виробництва біометану та станції для заправки, побудованих силами компаній Pot au Pin Energie, Air Liquide і Carrefour у місті Цестас у Франції (igrader.ru 13.08.2018). Після очищення біометан надходить у газорозподільну мережу, яка доставляє його на газові заправні станції по всій країні. Вантажівки мережі супермаркетів Carrefour використовують біометан для транспортування товарів, завершуючи тим самим цикл безвідходної економіки. Компанія Ivesco пропонує повний асортимент екологічно чистих транспортних засобів на біометані: легкі комерційні вантажні автомобілі, автобуси та мікроавтобуси.

В Естонії біометан становить третину від всієї енергії, що виробляється відновлюваними джерелами. Виробництво дотується Центром екологічних інвестицій. Центр підтримує будівництво 12 газозаправних станцій загальною вартістю 2,23 млн. євро.

Біометан із відходів стає об'єктом міжнародної торгівлі. Голландська компанія Essent вперше в історії уклала контракт на імпорт біогазу з біогазового заводу Великобританії. У 2017 році заводом було поставлено на експорт 20 млн. м³ біометану, що відповідає річному його виробництву біогазовим комплексом встановленою потужністю 5 МВт.

Компанія Акорд Лтд наводить наступні розрахунки, що свідчать про нібито недоцільність оснащення біогазових установок системами виробництва біометану. Компанія наводить дані, що для отримання 1000 м³ біометану потрібно 2000 м³ біогазу, при спалюванні якого можна отримати (нетто) 4000 кВт*г електроенергії та продати її державі за майже 500 євро при вартості 1000 м³ природного газу близько 350 євро. При цьому не враховується, що 1000 м³ біометану можуть замінити 1000 літрів рідкого моторного палива, які в еквіваленті коштують зараз в Україні 830 євро (925 дол. США).

Ще кращі показники мають місце у разі виробництва біометану з газу звалищ, коли витрати на виробництво біогазу відсутні. Собівартість виробництва біометану становить менше 150 євро за 1000 м³; муніципальний біометановий комплекс працює без зеленого тарифу, без приєднання до газових або електричних мереж. Економія від заміни дизельного пального на біометан на великовантажному муніципальному транспорті дає змогу швидко повернути необхідні інвестиції.

Внаслідок збільшення у світі частки розподіленої енергетики набуває актуальності необхідність стабілізації параметрів електричних мереж [9], тобто використання біогазових комплексів як балансуєвих потужностей електромереж. Компанія Акорд Лтд з посиланням на матеріали німецьких спеціалістів надає характеристики одного з таких комплексів, побудованого у Німеччині 2012 року. Назва комплексу – Naturenergie Osteraue, встановлена потужність 837 КВт, працює ~ 16 годин на день із середньою потужністю 563 КВт. Сховище газу – 6000 м³, робоча температура – 40 градусів. Покупець електроенергії – Energy2Market (E2M). Теплова енергія використовується для опалення та гарячого водопостачання приватних домогосподарств; дигестат використовується власником як добриво. Обсяг інвестицій – 2500000 євро. У Німеччині функціонує значна кількість подібних комплексів.

Таким чином, харчові відходи є вагомим енергетичним ресурсом. Їх слід піддавати ферментації окремо або в суміші з сільськогосподарськими відходами приміських господарств з метою отримання біогазу або в кінцевому результаті біометану. Виробництво електроенергії з біогазу та біометану не є самоокупним і потребує державної підтримки у вигляді спеціальних тарифів на вироблену енергію. Економічно виправданим є використання біометану як моторного палива транспортних засобів. Цей напрям набуває все більшого поширення у світі. Сортування відходів з метою вилучення з них харчових та ферментацію можна здійснювати безпосередньо на площадках сміттєспалюваних заводів (ССЗ).

Термічні технології енергетичного використання ТПВ – газифікація, піроліз, спалювання.

Газифікація відходів. Основним аргументом для застосування газифікаційних технологій перероблення ТПВ є їхня екологічність. Продукти спалювання генераторного газу потребують мінімальних витрат на очищення від пилу та шкідливих домішок порівняно з вихідним твердим паливом. Принциповими труднощами процесу газифікації твердих відходів, особливо побутових, є їхня гетерогенність. Можливим рішенням проблеми є виробництво штучного палива з органічної частини відходів – RDF (refuse derived fuel) – гомогенного з контрольованими характеристиками. Розширений огляд застосування газифікаційних технологій наведено у [10]. Автори роботи віддають перевагу комбінованим процесам із використанням декількох палив – вугілля, природного газу та генераторного газу, отриманого газифікацією біопалив. Компанія Foster Wheeler збудувала у 1999 році у

Фінляндії енергоблок потужністю 350 МВт з використанням 15% попередньо газифікованої біомаси. Інформації про практичну реалізацію технологій газифікації ТПВ небагато, а внаслідок складності технологій їхня суть не розкривається. Французька компанія SUEZ повідомляє, що вона експлуатує сім об'єктів WtoE, які виробили у 2017 році 1195 ГВтч електроенергії і зараз будує установку газифікації відходів потужністю 25 МВт у графстві Surrey для перероблення 250 тис. тонн відходів. Про технологію газифікації не повідомляється. Компанія Synova Power запатентувала технологію газифікації, яка, як зазначено в повідомленні, здатна переробляти всі види відходів – муніципальні, сільськогосподарські, лісові, комерційні – у вуглецево нейтральний синтетичний природний газ, який може бути використаний як паливо або хімічна сировина. Суть технології не розкривається, але стверджується, що її використання може забезпечити близько 15% світової потреби в енергії, що слід розглядати як перебільшення [11]. Підсумовуючи зазначене вище, можна зробити висновок, що газифікаційні технології перероблення ТПВ будуть мати обмежене застосування, оскільки їхнє використання вимагає спеціальної підготовки вихідної сировини для її гомогенізації та відповідно додаткових витрат.

Піроліз. Піроліз – це процес термічного розкладу органічної сировини без доступу повітря. Продуктами піролізу є горюча рідина, піролізний газ та твердий вуглецевмісний залишок. Співвідношення між рідкими, газоподібними та твердими продуктами піролізу залежить переважно від складу вихідного матеріалу, а також температури процесу. Характерними прикладами піролізу є виробництво коксу для металургійних потреб або піроліз відпрацьованих автопокришок. Піроліз ТПВ активно рекламується розробниками для використання їхнього енергетичного потенціалу. Вважається, що ця технологія може бути самоокупною за рахунок утворення так званої сирі нафти у кількості 20–30% від сухої маси біопалива. Однією з узагальнюючих публікацій у галузі піролізу є робота [12]. Значна кількість смол та кислотоутворюючих речовин у вихідних газах потребує їхнього очищення та використання обладнання з високою корозійною стійкістю. Зольність коксо-зольного залишку піролізу ТПВ становить до 70–80 %, що утруднює використання його як енергетичного ресурсу і унеможливує його безпечно депонування.

Гідро-піроліз. Новим елементом у технології піролізу біомаси є рециркуляція пірогазу на вхід у камеру піролізу. Таку технологію та обладнання презентує польсько-американська консалтингова компанія PLUS (Poland + US) для використання у процесі утилізації ТПВ або ТПВ з додаванням 30% осадів стічних вод [13]. Технологію називають гідро-піролізом від англійського hydrogen – водень, позначають D4. Напівпромислому установку потужністю за сировиною (pre RDF або RDF) 10200 т/рік (30 т/день) за технологією D4 збудовано та випробувано у місті Morgantown, штат Північна Кароліна (США). Нижня теплотворна спроможність сировини $Q_H \sim 14$ МДж/кг (~ 3350 ккал/кг), теплотворна спроможність пірогазу $Q_H \sim 22$ МДж/м³ (5260 ккал/м³). Кількість піролізного газу дає змогу у когенераційній системі встановити електричний генератор потужністю 1,5 МВт_{ел.} Вартість виробництва однієї установки без когенераційної частини становить 7 млн. євро. Слід, однак, зазначити, що технологія та установка мають елементи, надійність яких викликає сумніви. До них належить корозійна стійкість елементів у середовищі кислих газів за температури 850°C та інші недоліки піролізного процесу, зазначені вище. Необхідно враховувати й витрати на попередню підготовку палива.

Спалювання ТПВ. Це найбільш поширений, підтверджений практикою підхід до утилізації ТПВ. Він реалізується за технологіями спалювання у киплячому шарі, обертових печах, котлах із рухомим подом. Кількість ССЗ у Європі зростає. У 2010 році у країнах ЄС працювало 390 сміттєспалювальних заводів, а у 2016 році їх було вже 522, серед них у Франції – 126, Німеччині – 121, Італії – 41, Великобританії – 46, Швейцарії – 30, Швеції – 34, Польщі – 5 [14]. Середня потужність заводів становить від 100–114 тис. тонн на рік у Польщі та Франції, до 214–232 тис. т/рік – у Німеччині та Великобританії. В Україні працює один ССЗ. Нові ССЗ побудовані у Литві, Польщі, Китаї, Індії, Австралії, Дубаї та інших країнах. Їхньому будівництву сприяє заборона депонування сміття та мулу на полігонах. Не можна обійти увагою участь енергетичних компаній у розширенні ресурсної бази енергетики за рахунок використання різноманітних відходів, в першу чергу ТПВ, та забезпечення вирішення двоєдиної задачі енергетики і екології. Як приклад, наразі під Стокгольмом завершується будівництво потужного сміттєспалювального заводу за рахунок інвестицій від німецької енергетичної компанії E.ON. Інвестиції складають близько 500 млн. євро; термін окупності становить 40 років.

Тут не розглядаються технології спалювання у киплячому шарі та обертових печах. Киплячий шар потребує сировини однорідного фракційного складу та значних витрат на її підготовку, а спо-

рудження та експлуатація обертових печей пов'язані з великими капіталовкладеннями. Далі наведено два приклади організації у Швеції та Чехії технологій спалювання ТПВ у котлах, які можуть бути застосовані в Україні.

Сміттєспалювальний завод у м. Уппсала, Швеція, введено в експлуатацію у 2008 році; знаходиться, як і більшість ССЗ, у державній власності. Завод забезпечує дві третини потреб міста чистоті близько 160 тис. електроенергією та газом. ССЗ знаходиться на відстані 300 м від житлової забудови [15]. Біля 70% електроенергії, що виробляється, витрачається на підігрівання води, яка через теплообмінники надходить у міські теплові мережі. Кількість працівників – 100 чол., половина з них – водії сміттєвозів. У кожній зміні задіяно 15 працівників; підприємство максимально автоматизовано. Завод переробляє як власне сміття, так і надає послуги з утилізації сміття, завезеного з Великобританії. За переробку однієї тонни британського сміття завод одержує 70 євро.

У періоди пікових навантажень у разі нестачі сміття для виробництва необхідної кількості електроенергії на заводі використовується торф, який імпортується з Білорусі. Торф спалюють в окремій котельні на території заводу, оскільки спалювання торфу не потребує складної системи очищення. Використання торфу економічно більш вигідне, але основний прибуток підприємство отримує не за продаж електроенергії або газу, а від сплати за утилізацію сміття. У собівартості перероблення відходів біля 40% становлять витрати на заходи екологічної безпеки.

У статті [15] розвінчується розповсюджений в Україні міф про необхідність попереднього повного сортування сміття перед спалюванням. Цей міф проглядається у Національній стратегії управління відходами. На заводі в Уппсалі відсортовуються лише харчові відходи, з яких виробляється біогаз, а з нього – біометан, на якому працює муніципальний транспорт. Всі нехарчові відходи спалюються разом. Далі з шлаку магнітами вилучається метал, на ситах просіюються залишки скла, кінцевий залишок, кількість якого близько 1%, використовується як дешевий будівельний матеріал.

Функціонування заводу розвінчує також ще один розповсюджений в Україні міф про шкідливість спалювання сміття внаслідок викидів у повітря токсинів. У наведеному прикладі сусідство житла з заводом нікого в місті не бентежить через те, що під час спалювання дотримується технологія, насамперед, температура спалювання. Токсини утворюються за температур близько 650°C, а стандартна температура під час спалювання становить 1200°C. У разі її зниження нижче 850°C система безпеки автоматично припиняє спалювання. Неприємний запах від виробництва біогазу відчувається лише у приміщенні переробного цеху, але завдяки досконалій системі вентиляції не відчувається зовні. Таким чином, у випадку дотримання нормативів переробка сміття може бути абсолютно безпечною.

Важливою обставиною у справі будівництва ССЗ є фінансовий фактор. У [15] зазначається, що навіть за найдосконаліших технологій переробка сміття не може вийти навіть на собівартість. Необхідні кошти забезпечуються населенням: середнє домогосподарство сплачує близько 83 євро на рік за утилізацію ТПВ та ще 23 євро – за харчові, що в перерахунку на гривні на травень 2019 р. становить 265 грн. на місяць. В Україні тарифи встановлюються за узгодженням між місцевою адміністрацією та підприємством, що здійснює збір та вивезення відходів. Як приклад, у 2019 році тариф на вивезення та захоронення ТПВ у Києві для багатоквартирних будинків із сміттєпроводами складає 176,23 грн/м³. Розрахункова кількість утворення викидів – 0,1608 м³/особа*місяць.

Для України необхідність будівництва ССЗ невідворотна як з екологічних і енергетичних, так і політичних міркувань, оскільки Україна у відповідності до Угоди про асоціацію з ЄС повинна прийняти нове законодавство про відходи та збільшити частку відновлюваної енергетики у енергобалансі країни. Зауважимо, що будівництво ССЗ можливе лише у разі високого ступеня довіри населення до доброчесності переробників, як це має місце у Швеції, де ССЗ знаходиться майже всередині міської забудови. Для України був би справжнім проривом початок роботи щодо досягнення європейських стандартів у справі перероблення відходів та руйнування міфів у цьому питанні.

У наведеному прикладі ССЗ у Швеції технологія мінімізації шкідливих викидів достатньо складна. Вона включає селективне відновлення оксидів азоту шляхом інжекції аміаку у топковий простір, рециркуляцію димових газів, наявність абсорбційного теплового насоса, подвійну фільтрацію димових газів у електро- та тканинних фільтрах.

Значно простішою є технологія спалювання відходів, запроваджена у м. Брно, Чехія [16]. Потужність заводу розрахована на обслуговування території з населенням два млн. мешканців. Технологічна лінія облаштована двома котлами з реверсними похило-перештовхуючими решітками та конденсаційною двоступінчатою турбіною. Ступінь високого тиску турбіни використовується для виробництва електроенергії, пара – для виробництва теплоти у системі централізованого опалення м. Брно. Відзначається

зменшення ваги відходів до 28% від початкових значень, а обсягу – до 10%. Кількість органічних речовин у шлаку знаходиться в межах 1–5%. Система очищення гарантує мінімальну емісію в навколишнє середовище, рівень якої порівнянний з емісією від електростанцій на природному газі.

Детальний опис технологічної схеми наведено у [16]. Зважувальна система автоматизована і керується спеціальною програмою. Сировина, що підлягає спалюванню, розділяється на два потоки. Один із них направляється на спалювання, другий – на додаткове сортування. Шихта подається у котли через вісім отворів; будучи один раз запаленою, вона не потребує додаткового палива. У котли подається хімічно очищена вода. Вихідні гази піддають напівсухій обробці вапном, після чого вони подаються у мокрі абсорбери. У випадку перевищення «кислих» компонентів у димових газах у потік між абсорберами та тканинними фільтрами автоматично впорскується сухе вапно. Кінцевий продукт системи газоочищення складається зі з'єднань вапна, летючої золи, активованого вугілля та надлишку реагентів. Ефективність системи очищення оцінюється у 99% і відповідає екологічним вимогам.

Порівнюючи системи очищення у роботах [15] та [16], можна зробити висновок, що для умов України у випадку деякого віддалення майбутніх ССЗ від житлових масивів доцільно розробити систему очищення викидних газів переважно на основі чеської розробки з додаванням деяких елементів із системи очищення ССЗ, що застосовуються у м. Уппсала, зокрема, встановити на лінії очищення додатково електрофільтр.

Перед прийняттям рішення про будівництво ССЗ необхідно вирішити важливе питання щодо його потужності. З наведених вище даних про кількість ССЗ у країнах Європи можна зробити висновки про їхню відносно невелику потужність. Будівництво невеликих ССЗ можна розглядати як тенденцію у вирішенні питання енергетичного використання відходів середніх та малих міст та регіонів. У разі їхнього проектування використовуються прості, надійні випробувані рішення. Як приклад, компанія Steinmüller Babcock Environment буде другу чергу СМЗ у невеликому місті Premnitz у природному парку біля Берліна. На ССЗ як паливо буде використовуватися суміш побутових, комерційних відходів та RDF у кількості 150000 т/рік; теплова потужність 56 МВт_т. Як основне обладнання буде встановлено котел із похило-перештовхуючою решіткою замість котла з киплячим шаром, який використовується у першій черзі заводу. Оскільки власне споживання енергії невелике, електрична та теплова енергія будуть постачатися місцевим промисловим споживачам та населенню. Таку тенденцію можна пояснити складністю організації збору сміття на великих територіях, а також суттєвою вартістю перевезень сміття та залишків від його перероблення.

Звалищний газ. «Свіжі» відходи підлягають використанню за однією з зазначених технологій. На старих полігонах доцільно вилучати так званий звалищний газ, а решту переробляти залежно від віку полігону та вмісту в ньому органічних речовин. Звалищний газ є за своїм складом біогазом і складається з метану, діоксиду вуглецю та домішок – азоту, невеликої кількості сірководню. Виділення звалищного газу починається через 7–10 років після введення в експлуатацію полігону і відбувається протягом 20–25 років. У процесі вилучення газу його склад змінюється у бік збільшення в ньому азоту та зменшення кількості метану. Кількість вилученого біогазу становить близько чверті від усього обсягу, що виділяється за весь період життя полігону [6].

В Україні накопичено значний досвід проектування та введення у дію установок з виробництва електроенергії з використанням звалищного газу. Наразі на 20 полігонах побудовано системи збору біогазу з використанням його для виробництва електроенергії та продажу за «зеленим» тарифом. Установки включають системи очистки газу, двигуни внутрішнього згоряння та електрогенератори. Загальна встановлена потужність генераторів 18,4 МВт. Проте слід зауважити, що вилучення біометану з газу звалищ та використання його як моторного палива є економічно більш ефективним і самоокупним заходом.

Висновки. Технологію використання відходів для кожного міста або регіону слід обирати з урахуванням їхньої кількості, складу, теплотворної спроможності, транспортних витрат.

Загальний енергетичний потенціал відсортованих побутових відходів у еквіваленті природного газу оцінюється в Україні у 1,5 млрд. м³ на рік. Використання відсортованих харчових відходів у суміші з відходами сільського господарства або спеціально вирощеними рослинами може збільшити цей показник у рази. Як приклад, у Німеччині в енергетичних цілях виробляється і використовується 8,3 млрд. м³ біометану, а встановлена потужність генерації становить 4 ГВт.

Інвестиційно привабливими є технології виробництва біогазу з харчових відходів, подальшим виробництвом із нього електричної енергії, продажу її за «зеленим» тарифом та виробництвом біометану. Міжнародний досвід свідчить про участь відомих енергетичних компаній у виробництві біо-

газу та будівництві сміттєспалювальних заводів. В Україні вирішенням таких проблем мали б зацікавитися і взяти участь НАК «Нафтогаз України», ДПЕК, Енергоатом, місцеві адміністрації та територіальні громади.

У транспортній енергетиці набуває поширення використання отриманого з відходів біометану моторного палива для транспортних засобів. За підтримки енергетичних та автовиробничих компаній Gasum, Iveco, Capstone, Volkswagen розроблені та виконуються програми його широкомасштабного використання поряд із природним газом у стисненому та зрідженому станах.

Слід зазначити доцільність використання біогазових комплексів як балансуєчих потужностей енергомереж.

Газифікація та піроліз відходів потребують їхньої спеціальної підготовки – ретельного сортування, подрібнення, гомогенізації, систем видалення смоли та інших включень із генераторного газу та пірогазу. У разі виготовлення з відходів RDF додаються операції грануляції, торефікації, подрібнення, що призводить до подорожчання процесу.

Серед технологій енергетичного використання ТПВ найбільшого поширення у світі набула технологія їхнього спалювання з виробництвом електричної та теплової енергії. Для України можна вважати найбільш прийнятною просту, надійну та випробовану технологію спалювання ТПВ із відсортуванням лише харчових відходів, спалюванням решти органічної маси у котлах з рухомих подом, випробованою і відносно менш коштовною системою очищення вихідних газів.

1. Енергетична стратегія України до 2035 року: безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р.
2. Національна стратегія управління відходами до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р.
3. Войціховська А. Розчистити Україну: місія (не)здійсненна? URL: <https://dt.ua/ECOLOGY/rozchistiti-ukrayinu-misiya-ne-zdiysnenna-254196.html> (дата звернення 16.05.2019)
4. Про відходи. Закон України № 187/98-ВР від 5 березня 1998 року. Редакція від 04.10.2018. *Відомості Верховної Ради України*. 1998. № 36-37. 242 с.
5. ESWET Responds to Eurostat Findings on Municipal Waste Treatment in EU. Інформаційний лист ISWA – міжнародної асоціації твердих відходів (International Solid Wastes Association) від 05.02.2019 р.
6. Жук Г.В., Нікітін Є.Є., Сміхула А.В., Дутка О.В., Іванів О.С. Визначення оптимальних схем поводження з твердими побутовими відходами міст України. *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2018. № 1. С. 48-59.
7. Ukraine Landfill Gas Model. Landfill Methane Outreach Program US Environment Protection Agency Washington DC. 12/2009. 28 р. URL: https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (дата звернення 16.05.2019)
8. Інформація від компанії Акорд Лтд. URL: <https://www.bio-gas.com.ua/biogas> (дата звернення 08.05.2019)
9. Кириленко О.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Монографія. Київ. Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
10. Belgiorno V., De Feo G., Della Rocca C. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management* 23. 2003. Iss.1. Pp. 1–15.
11. Clean Investment Firm Full Cycle Backs Waste Gasification Technology. *Newsletter*. 2018, 11 November. URL: <http://waste-management-world.com> . (дата звернення 06.05.2019)
12. Uddin M., Techato K., Taweekun J., Rasul M., Mahlia T., Ashrafur S. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 11.3115. 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en1113115> .
13. Near-zero emission Bio-CHP Waste-to-Energy is now: Waste-to-Syngas-to-EcoEnergy with D4 Technology Installation (the only Hydro-Pyrolysis WtE Installation in the world). *PLUS Development Group Polska. Presentation*. 2014. 41 p. URL: <http://www.plusdg.com> (дата звернення 16.05.2019)
14. Матвеев Ю.Б., Гелетуха Г.Г. Перспективи енергетичної утилізації твердих побутових відходів в Україні. *Аналітична записка Біологічної асоціації України*. 2019. № 22. 47 с. URL: <http://www.uabio.org/activity/uabio-analytics> (дата звернення 16.05.2019)
15. Панченко Ю. Мусорный завод возле дома: три мифа об утилизации отходов в Швеции. *Европейская правда*. 09.11.2018.
16. Technical Overview of the Waste-to-Energy Plant in Brno, Plant for Region with 2 mil. people. 2017. URL: <http://www.sako.cz/page/en/607/waste-to-energy/> . (дата звернення 06.05.2019)

ТВЕРДЫЕ БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕСУРС

И.Н. Карп, академик НАН Украины, К.Е. Пьяных, докт.техн.наук

Институт газа НАН Украины,

ул. Дегтяревская, 39, Киев, 03113, Украина,

e-mail: karpkiev@gmail.com, pyanykh@gmail.com

Проанализированы технологические аспекты энергетического использования твердых бытовых отходов и возможности применения некоторых технологий в Украине. При частичной сортировке отходов можно использовать для производства энергии половину их энергетического потенциала, что для Украины оценивается в эквиваленте природного газа в 1,5 млрд.м³ в год. Доля пищевых отходов близка к 40%. Их целесообразно перерабатывать в смесях с отходами сельскохозяйственной деятельности и энергетическими растениями в биогаз и биометан. Производство электрической и тепловой энергии из биогаза нуждается в помощи государства в виде специальных тарифов. Получает распространение использование биометана наряду с природным газом в сжатом и сжиженном состоянии в транспортной энергетике. Биогазовые комплексы используются в качестве балансирующих мощностей электросетей. Наиболее распространенной технологией использования энергетического потенциала твердых бытовых отходов является сжигание. Системы очистки выхлопных газов мусоросжигательных заводов достигли степени совершенства, которое позволяет размещать их вблизи жилой застройки. Библиограф. 17, табл. 2.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, пищевые отходы, биометан, сжигание.

MUNICIPAL SOLID WASTES AS ENERGY RESOURCE

I.M. Karp, K.Y. Pyanykh

The Gas Institute of NAS of Ukraine,

39, Dehtiarivska str., Kyiv, 03113, Ukraine,

e-mail: karpkiev@gmail.com, pyanykh@gmail.com

Technological aspects of energy use of solid municipal wastes and possibilities of application of some technologies in Ukraine are analyzed. Partial sorting of wastes can use for energy production half of their energy potential that for Ukraine is estimated in an equivalent of natural gas in 1,5 billion m³. The share of food waste is close to 40%. It is advisable to process them into biogas and biomethane in mixtures with agricultural waste and energy plants. The production of electricity and heat from biogas requires the assistance of the states in the form of special tariffs. The use of biomethane, along with natural gas in a compressed and liquefied state in the transport energy sector is becoming widespread. Biogas complexes are used as balancing capacities of power grids. The most common technology for using the energy potential of solid waste is incineration. Waste incineration plant exhaust gas treatment systems have achieved a degree of perfection that allows them to be placed close to residential buildings. References 17, tables 2.

Key words: municipal solid wastes, food wastes, biomethane, combustion.

1. Energy Strategy of Ukraine till 2035: Security, Energy Efficiency, Competitiveness. The Order of Cabinet of Ministers dated. August 18, 2017 № 605-p. (Ukr)
2. National strategy of management wastes till 2030. Order of Cabinet of Ministers of Ukraine from November 8, 2017. № 820-p. (Ukr)
3. Voitsikhovska A. Clear Ukraine: mission (not) feasible? URL: https://dt.ua/ECOLOGY/rozchistiti-ukrayinu-misiya-ne-zdiysnenna-254196_.html (accessed 16.05.2019). (Ukr)
4. About wastes. A law of Ukraine No 187/98-VR on March, 5, 1998. Release from 04.10.2018. *Lists of Supreme Council of Ukraine*. 1998. No 36-37. 242 p. (Ukr)
5. ESWET Responds to Eurostat Findings on Municipal Waste Treatment in EU. Informative sheet of ISWA - international association of hard wastes (International Solid Wastes Association) dated 05.02.2019 p.
6. Zhuk H.V., Nikitin E.E., Smikhula A.V., Dutka O.V., Uvaniv O.S. Determination of optimal schemes of solid wastes management in cities of Ukraine. *Energotekhnologii i resursosberezhennie*. 2018. No 1. Pp. 48-59. (Ukr)
7. Ukraine Landfill Gas Model. Landfill Methane Outreach Program US Environment Protection Agency Washington DC. 12/2009. 28 p. URL: https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (accessed 16.05.2019)
8. Information from Company Accord Ltd. URL: <https://www.bio-gas.com.ua/biogas> (accessed 08.05.2019)
9. Kyrylenko O.V. Intelligent Electric Networks: Elements and Models. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2016. 400 p. (Ukr)
10. Belgiorio V., De Feo G., Della Rocca C. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management* 23. 2003. Iss. 1. Pp. 1-15.
11. Clean Investment Firm Full Cycle Backs Waste Gasification Technology. *Newsletter*. 2018, 11 November. URL: <http://waste-management-world.com> (accessed 06.05.2019)
12. Uddin M., Techato K., Taweekun J., Rasul M., Mahlia T., Ashrafur S. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 11.3115. 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113115>.
13. Near-zero emission Bio-CHP Waste-to-Energy is now: Waste-to-Syngas-to-EcoEnergy with D4 Technology Installation (the only Hydro-Pyrolysis WtE Installation in the world). *PLUS Development Group Polska. Presentation*. 2014. 41 p. URL: <http://www.plusdg.com> (accessed 16.05.2019)
14. Matveyev Y.B., Geletukha G.G. Perspectives of energy utilization of solid wastes in Ukraine. *Analytical note of the Ukrainian Biology Society*. 2019. No 22. 47 p. URL: <http://www.uabio.org/activity/uabio-analytics> (accessed 16.05.2019)
15. Panchenko Yu. Waste treatment plant near home: three mythes about wastes utilization in Sweden. *European true*. 09.11.2018. (Rus)
16. Technical Overview of the Waste-to-Energy Plant in Brno, Plant for Region with 2 mil. people. 2017. URL: <http://www.sako.cz/page/en/607/waste-to-energy/> (accessed 06.05.2019)

Надійшла 24.05.2019

Остаточний варіант 06.07.2019