

# Очистка и переработка отходов

УДК 665.66

DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2019.05>

**Карп І.М.,** *акад. НАН України, докт. техн. наук, проф.,*  
**П'яних К.Є.,** *докт. техн. наук, П'яних К.К.*  
**Інститут газу НАН України, Київ**  
*вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: karpkiev@gmail.com*

## Утилізація осадів стічних вод

Технології утилізації осадів стічних вод мають відповідати двом вимогам: використанню енергетичного потенціалу та відсутності негативного впливу на оточуюче середовище продуктів їх перероблення. Розробляються нові технології утилізації осадів, що відповідають цим вимогам: піроліз, гідропіроліз, комбіновані процеси збродження та газифікації, полігенерація, парова конверсія, газифікація сумішей з іншими видами палива, термокаталітичний риформінг, триступенева газифікація. Більшість з цих технологій ще не знайшла промислового використання. Енергетичний потенціал свіжих осадів в Україні оцінюється у 446 тис. т умовного палива. Його використання для виробництва електричної та теплової енергії та вторинних рідких і твердих палив доцільно як такого, що відповідає світовій тенденції розвитку децентралізованої енергетики. Економічно ефективною, прийнятною для умов України технологією утилізації осадів є їх спільне спалювання з іншими твердими паливами та відходами у котлах ТЕС та цементних печах. Для об'єктів децентралізованої енергетики слід надати перевагу процесам газифікації або піролізу осадів стічних вод. Для утилізації накопичених осадів прийнятною є технологія компостування. *Бібл. 27, рис. 5, табл. 3.*

**Ключові слова:** осадки стічних вод, утилізація, технології, ефективність, екологія.

Утилізація та знешкодження мулових осадів міських стічних вод (ОСВ) є проблемою світового масштабу, не вирішеною повною мірою до цього часу. В літературі розглядаються різні можливості використання ОСВ: як добрив, у процесах рекультивации земель, а також енергетичного використання шляхом прямого спалювання або після попередньої термічної переробки. Існує багато технологій термічної обробки осадів, а також у літературних джерелах є інформація про розроблення нових технологій. Найчастіше термічна обробка виконується за методами ферментації з отриманням біогазу або піролізу чи газифікації. Біогаз використовується для власних

потреб станцій аерації; піроліз частіше за все спрямований на отримання рідкого палива та твердого горючого залишку. В свою чергу і піроліз, і газифікація мають власні технологічні варіанти та комбінації. Напрямки та технології утилізації ОСВ залежать від багатьох факторів та визначаються окремо для кожних конкретних умов, що складаються у кожній країні. Як приклад, в країнах колишнього СРСР ОСВ переважно вивозяться на полігони після ферментативної обробки або навіть без такої. В скандинавських країнах поширене компостування з наступним використанням компосту для рекультивации та облагороджування земель у парках та

на інших територіях. При виборі технології утилізації ОСВ перш за все необхідно визначити основне її спрямування — використання в сільському господарстві, енергетичне використання, землеупорядкування або знешкодження.

Огляд стану та напрямків утилізації осадів стічних вод приводить до висновку, що пріоритетом у справі утилізації ОСВ є їх знешкодження у порівнянні з корисним використанням. З урахуванням цієї тенденції набуває скорочення сільськогосподарське використання осадів. Можна очікувати, що з часом термічна обробка осадів буде основним напрямком їх утилізації [1].

Розглядаючи питання термічної утилізації ОСВ, необхідно оцінити їх енергетичний потенціал та вирішити, чи є їх утилізація лише екологічною проблемою, чи також енергетичною. За великим рахунком будь-який обраний вид використання має передбачати екологічні обмеження та вимоги. Для визначення можливості використання осадів стічних вод як енергетичного ресурсу необхідно детально розглянути їх склад, енергетичні та екологічні показники, існуючі технології їх переробки та напрями використання. При цьому слід опиратися на закордонний досвід, оскільки в Україні використання ОСВ вкрай обмежене.

**Таблиця 1. Утворення осадів стічних вод у країнах Європи [2]**

Країна-член ЄС	Рік запису даних	Утворення мулу, тис.т сухого/рік	Населення, млн	Утворення мулу, кг сухого/ (особа-рік)
Данія	2005	140	5,5	25
Франція	2002	910,2	64,4	14
Німеччина	2006	2060	82,2	25
Італія	2006	1070	59,6	18
Нідерланди	2003	550	16,5	33
Португалія	2002	409	10,5	38
Іспанія	2006	1065	46	23
Швеція	2006	210	9,2	23
Великобританія	2006	1545	61	25
<b>Середня по EU-15</b>		<b>8787</b>	394	22
Болгарія	2006	30	7,4	4
Чехія	2006	220	10,3	21
Латвія	2006	24	2,3	10
Литва	2006	71	3,4	21
Польща	2006	524	38,1	14
Румунія	2006	137	21,5	6
Словакія	2006	55	5,4	10
<b>Середня по EU-12</b>		<b>1217</b>	103	12
<b>Всього по ЄС</b>		<b>10003</b>	497	20
Чернігів*	2018	9,125	0,25	36,5
Одеса*	2018	30,295	1	30

\*Дані місцевих служб.

Для приблизної оцінки енергетичного потенціалу осадів можна скористатись даними табл.1.

У роботі [3] наведені дані про кількість осадів комунальних стічних вод станом на 1995 р., млн т по сухій речовині: у Великобританії, Франції, Італії — по 1,0–1,5; Німеччині — 2,5; Західній Європі в цілому — 7,4; Японії — 1,5. У Росії, за різними оцінками, щорічно утворюється до 2 млрд м<sup>3</sup> осадів з вологістю 96–97 %, або 80–100 млн м<sup>3</sup> по сухій речовині. Рівень їх використання оцінюється у 1,0–1,5 %. Наведені дані корелюються з даними табл.1 з урахуванням різниці у часі їх реєстрації.

Приймаючи до уваги дані табл.1 щодо європейських країн-членів ЄС та міських служб водоканалів деяких міст України, можна вважати, що середнє значення питомої кількості осадів в Україні є 30 кг на 1 особу у рік. Можна також умовно прийняти, що осаді утворюються переважно в містах і що кількість міського населення України становить 70 % від загальної та складає 30 млн осіб. Загальна кількість «свіжих» осадів у розрахунку на суху масу становитиме 900 тис. т.

Теплотворну спроможність свіжих осадів прийемо на підставі власних досліджень

14500 кДж/кг сухої речовини, тобто 3470 ккал/кг. При цих умовах загальний паливний потенціал «свіжих» осадів становитиме 446 тис. т умовного палива, тобто незначну частину від загального постачання первинної енергії, яке становить 96 млн т нафтового еквіваленту [4]. З цієї кількості осадів при ККД перетворення теплової енергії на електричну 0,3 можна виробити більше 1 млрд кВт-год електроенергії за рік. Загальна встановлена потужність електрогенерації становитиме 120–130 МВт.

З точки зору масштабів енергосистеми ця цифра виглядає невеликою, але з точки зору розподіленої енергетики — вартою уваги. Слід приймати до уваги очікуваний стрімкий розвиток децентралізованої енергетики, що прогнозується експертами галузі та від-

значено в огляді [5]. До показників свіжих осадів слід додати паливний потенціал накопичених осадів, вивезених на мулові поля. Цей потенціал характеризується значною невизначеністю. Комплексних досліджень таких осадів не виконувалося, а результати тих, що виконувалися, не надають загальної картини. Можна очікувати, що питома енергетична цінність накопичених осадів менша, ніж свіжих, внаслідок того, що вони в основному складаються з дігестату, в якому кількість органічних речовин менша у порівнянні із свіжими осадами.

У висновках до огляду [1] підкреслювалася європейська тенденція у вирішенні проблеми утилізації ОСВ. Ця тенденція полягає у все ширшому застосуванні саме термічних методів їх утилізації, які є по суті єдиним надійним способом позбавлення ОСВ від органічних та бактеріальних забруднювачів, до яких відносяться тверді побутові відходи (ТПВ), фекалії, нафтопродукти, волосся, волокна рослин, а також мікроорганізми, такі як коки, палички, спірили, збудники шлунково-кишкових та інших хвороб, у великій кількості яйця гельмінтів, плісняві та дріжджеві гриби, водорості та ін. Картину доповнюють забруднення мінерального походження: пісок, частинки глини, масла, кислоти, луки, солі, а також промислові відходи. Промислові стоки мають приблизно 15 найменувань (цинк, свинець, мідь, кадмій, нікель, марганець, хром, арсен, селен, сурма, ртуть та ін.). Вважається, що промислові стоки проходять первинне очищення безпосередньо на підприємствах, небезпечні відходи, зокрема медичні, знешкоджуються на місцях та не потрапляють у ТПВ та стоки, але на практиці ці вимоги часто порушуються.

Найбільш поширеними термічними технологіями є спалювання, піроліз, газифікація. Спалювання ОСВ може бути моно або спільне з іншими паливами: вугіллям, твердими побутовими або іншими відходами. Моно спалювання здійснюють у печах обертових, багатоподових, циклонних та печах з псевдозрідженим, так званим киплячим, шаром (КШ).

Кожна із зазначених технологій має свої переваги та недоліки. Загальні переваги термічних технологій — повне знешкодження органічних складових ОСВ та придатність золи до депонування на полігонах. Загальні недоліки — неконтрольоване випаровування солей важких металів у димові гази та необхідність, як наслідок, встановлення багатокоштовних систем газоочистки, інколи необхідність вирішення проблеми переробки золи перед її депонуванням. Зола може містити залишки важких металів та недопалений вуглець.

При недостатньому рівні зневоднення ОСВ перед спалюванням необхідно витратити додаткову енергію для їх термічного підсушування. Це стосується в основному технології спалювання у КШ. Всі термічні технології є бруто збитковими.

Щодо основних характеристик технологій термічної нейтралізації необхідно виділити наведені далі. Перевагою обертових та багатоподових печей є об'єднання в одному робочому просторі зон сушіння та горіння, що забезпечує можливість використання недостатньо зневоджених осадів. Недоліками обертових печей є нещільність, висока капітало- та енергоємність. Недоліками багатоподових печей є також висока капіталоємність, наявність рухомих частин, корозія елементів, нерівномірність температур в об'ємі речовини.

Перевагою печей КШ є рівномірність температур у шарі, низька температура горіння та низьке значення викидів  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  (можливе додавання вапна у шар),  $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ , токсичних органічних речовин; відсутність необхідності у додатковому паливі при достатньо зневодненій сировині; добре вигорання з малими втратами; можливість використання мулів у великому діапазоні їх теплотворної спроможності. Вважається достатньою теплотворна спроможність ОСВ, що подаються у топковий простір, на рівні 4,2 МДж/кг.

Недоліками технології КШ є невисокий ККД перетворення теплової енергії осадів на електричну, необхідність ретельного догляду та зживання заходів для непопадання габаритних включень у робочий простір та поломки транспортуючого обладнання, злипання та спікання шихти, корозія елементів, значний пиловинос, обмежений діапазон регулювання процесу. Незважаючи на ці недоліки технологія КШ найбільш розповсюджена для спалювання ОСВ.

Спільне спалювання потребує відповідних печей, як на ТЕС або сміттеспалювальних заводах, а також оснащення таких печей сучасною очисткою димових газів для прийому, змішування та подачі мулу. Приймання мулу на спалювання платне. При вартості перероблення мулу 40 євро/т у печі КШ продуктивністю 17 тис.т/рік австрійська компанія Kalogeo [6] не витримала конкуренції та припинила діяльність. Це при тому, що використовувався достатньо сирій мул, тобто значна частина витрат на сушіння мулу зберігалася. У топку подавалася суміш сухого та вологого (75 %) мулу з усередненою вологістю 47 % та теплотворністю 4,2 МДж/кг.

В останні декілька років у світі спостерігається сплеск досліджень та відповідно публікацій щодо утилізації ОСВ. Особливо ба-

гато досліджень виконується у Китаї. У зв'язку з процесом урбанізації у Китаї та посиленням стандартів до викидів виникла потреба системного рішення щодо управління утилізацією ОСВ, яке забезпечує екологічну ефективність, соціальну прийнятність та економічну доступність на протязі життєвого циклу. Для нових міст необхідно вибрати такі технології утилізації ОСВ, які давали б можливість використовувати їх енергетичний потенціал та забезпечували б відповідність зростаючим екологічним вимогам. Про деякі з нових напрямків розробок термічних технологій утилізації ОСВ йдеться далі. Слід зауважити, що технології утилізації горючої маси ТПВ, біомаси різного походження: сільськогосподарського виробництва, лісового господарства, деяких промислових – та осадів стічних вод подібні, та у літературних джерелах позиціонуються розробниками як універсальні, до чого потрібно поставитися критично. Зауважимо також, що більшість нових розробок ще не вийшла на стадію промислової реалізації.

**Піроліз ОСВ.** Традиційний піроліз є одним з тих, що найчастіше пропонується для використання енергетичного потенціалу біомаси та ТПВ, але піроліз ОСВ ще не знайшов широкого застосування. Вважається, що ця технологія може бути самоокупною за рахунок утворення так званої сирової нафти у кількості 20–30 % від сухої маси біопалива. Сира нафта може використовуватися безпосередньо як котельно-пічне паливо. Після перегонки з неї можна отримати серед численних органічних речовин також високоякісні малосірчані моторні палива: бензин та дизельне пальне. При низькотемпературному піролізі ОСВ основна кількість важких металів залишається у зольному залишку.

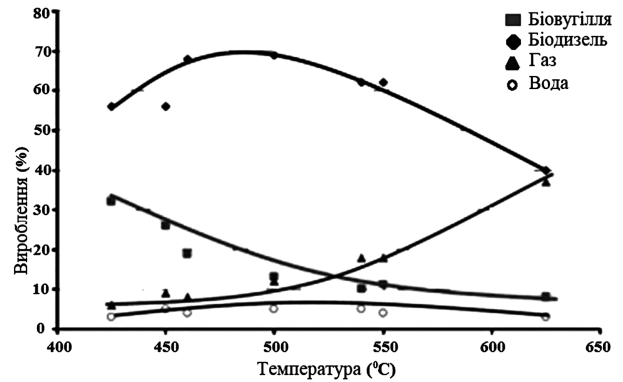


Рис.1. Вихід продуктів піролізу біомаси в залежності від температури процесу.

Однією з узагальнюючих публікацій в галузі піролізу є робота [7]. Показана на рис.1 залежність виходу продуктів піролізу від температури процесу є універсальною для піролізу всіх видів біомаси: з підвищенням температури у реакційній зоні зростає вихід пірогазу та зменшується кількість твердого залишку (золи). Цей факт є важливим з точки зору його безпечного захоронення. Недоліками піролізу є наявність у золі самоспалахуючих речовин, що потребує спеціальних умов їх розміщення. Значна кількість кислотоутворюючих речовин у вихідних газах потребує використання обладнання з високою корозійною стійкістю. Зольність коксозольного залишку становить до 70–80 %, що утруднює використання його як енергетичного ресурсу та унеможливує його безпечне депонування.

**Гідропіроліз.** Новим елементом у технології піролізу біомаси є рециркуляція біогазу

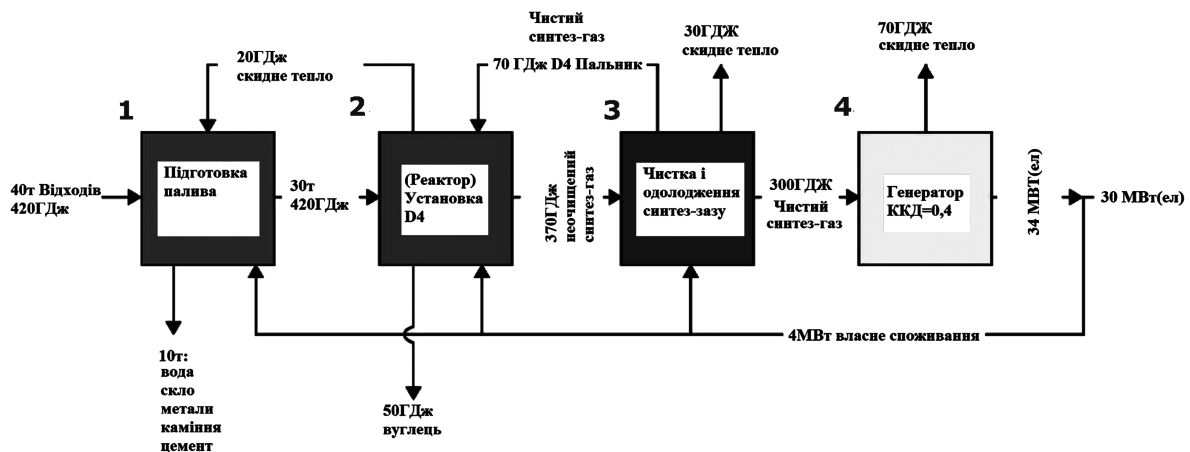


Рис.2. Енергетичний баланс установки гідропіролізу [8].

на вхід у камеру. Таку технологію та обладнання презентує польсько-американська консалтингова компанія PLUS (Poland + US) для використання у процесі утилізації ТПВ або ТПВ з додаванням 30 % ОСВ [8]. Технологію називають гідропіролізом від англійського hydro – водень, позначають D4, її розробником є американська компанія-партнер D4 Energy Group. Напівпромислому установку потужністю по сировині (pre RDF або RDF) 10200 т/рік (30 т/доба) по технології D4 збудовано та випробувано у США у місті Morganton, штат Північна Кароліна. Вологість сировини близько 15 %, нижня теплотворна спроможність  $Q_H \sim 14$  МДж/кг ( $\sim 3350$  ккал/кг). Хімічна енергія виробленого біогазу (сингазу) становила на добу 370 ГДж ( $16800 \text{ м}^3$ ) з  $Q_H \sim 22$  МДж/м<sup>3</sup> ( $5260$  ккал/м<sup>3</sup>). Енергетичний баланс установки наведений на рис.2.

Кількість газу, яка видається для зовнішнього використання, дає можливість у когенераційній системі встановити електричний генератор потужністю 1,5 МВт<sub>ел.</sub> Основним елементом технологічної схеми D4 є піч гідропіролізу, оснащена двома трубами, у яких відбувається основний процес. Усередині труб розміщені шнеки, що проштовхують через них сировину (рис.3).

Шнеки обігріваються ззовні чотирма пальниками, що працюють на сингазі. Фактичний склад пірогазу (сингазу, синтез-газу) не наводиться, але, посилаючися на інформацію Центру поводження з відходами Інституту будівництва та гірничої справи у Варшаві, авторами презентації сповіщається, що отриманий газ «горючий та по хімічному складу подібний при-

родному», а саме:  $\text{H}_2$  – 10 %,  $\text{CH}_4$  – 20 %, етан, бутан, пропан та інші важкі вуглеводні  $\text{C}_m\text{H}_n \sim 30$  %, а також  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  та ін. Очевидно, що наведений авторами презентації склад отриманого газу відрізняється від складу природного, але його висока калорійність  $5260$  ккал/м<sup>3</sup> ( $\sim 22$  МДж/м<sup>3</sup>) у порівнянні з калорійністю класичного синтез-газу (суміші водню та оксиду вуглецю)  $2400$  ккал/м<sup>3</sup> ( $10$  МДж/м<sup>3</sup>) або коксового газу  $4000$  ккал/м<sup>3</sup> ( $16,4$  МДж/м<sup>3</sup>) вказує на значний вміст у ньому метану та важких вуглеводнів. В описаних умовах вірогідна реакція метанізації вуглецю сировини, яка добре протікає в умовах надлишку водню.

У Польщі утворюється 15 млн т ТПВ на рік. Від січня 2016 р. у Польщі заборонено вивозити на сміттєзвалища відходи з теплотворною спроможністю більше 6 МДж/кг ( $1435$  ккал/кг), а це практично всі відходи, крім скла, металу та мінералів. Ринок установок D4 у Польщі оцінюється у 300 одиниць, вартість виробництва однієї установки без когенераційної частини становить 7 млн євро. Компанія запрошує інвесторів до організації серійного виробництва установок та їх постачання у країни Європи.

Слід зазначити, що технологія та установка мають елементи, надійність яких викликає сумніви. До них відноситься корозійна стійкість корпусу шнекового пристрою та власне шнеку у середовищі кислих газів при температурі  $850$  °С, можливість попадання важких металів у газову та тверду фази. Для них характерні й інші недоліки піролізного процесу, зазначені вище.

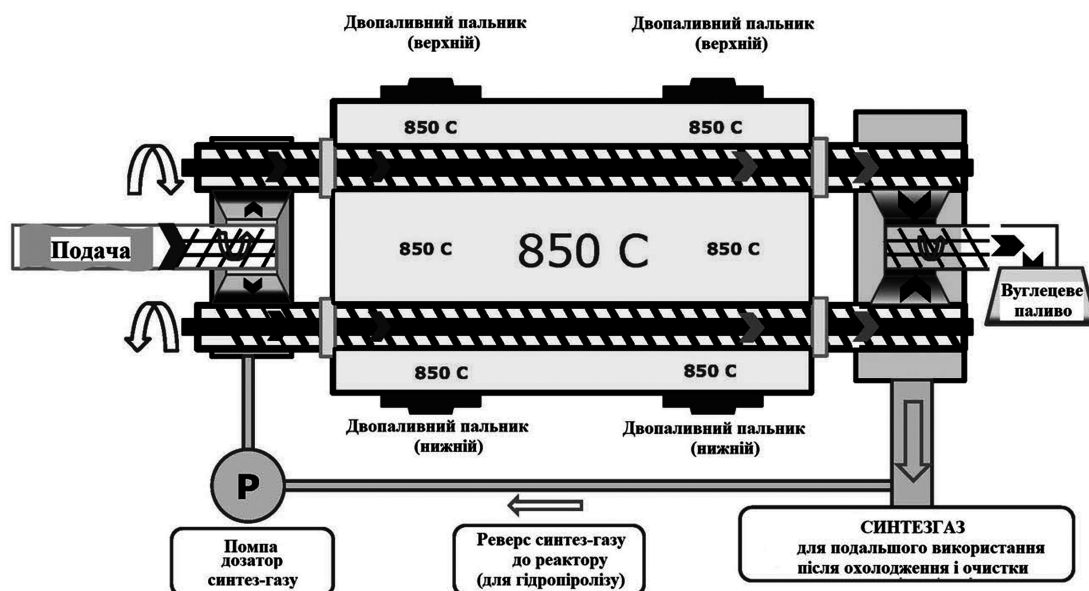


Рис.3. Піч піролізу установки гідропіролізу по технології D4 [8].

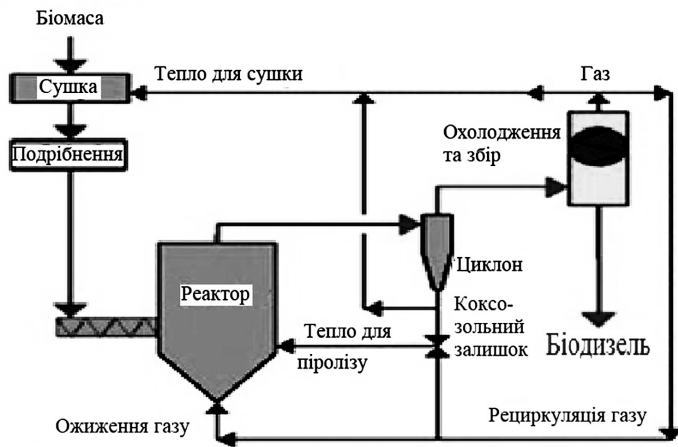


Рис.4. Схема установки гідропіролізу у киплячому шарі з рециркуляцією пірогазу [9].

На думку авторів цієї статті, установки такого типу після детальних випробувань могли бути використані в Україні для утилізації ТПВ та ОСВ у невеликих та середнього розміру містах. При цьому для виготовлення корпусу та шнеку доцільно використовувати кислото-стійкий чавун, алюмокремнієвий сплав або інші підходящі матеріали та покриття, дослідити хімізм процесу та його екологічні характеристики, визначити допустимі значення вологості та зольності. Слід приймати до уваги витрати на попередню підготовку палива.

Аналогічний процес рециркуляцією пірогазу випробований у лабораторному масштабі [9]. Схема установки показана на рис.4.

Процес здійснюється у реакторі з КШ та спрямований на отримання з біопалива так званої біо-нафти. Зворотній газ рециркуляції використовується як агент для псевдозрідження подрібненої біомаси. Технологія рекомендується особливо для південно-азійських країн, що розвиваються, оскільки у цих країнах значну частку первинних паливних джерел становлять біопаливо та відходи біологічного характеру. Перевагою процесу можна вважати відсутність реактору, виготовленого з металевих матеріалів.

Екологічні наслідки процесу піролізу ОСВ досліджені у роботі [10]. Висушений сировинний шлам піролізували при температурі від 400 до 600 °С для дослідження впливу температури піролізу на властивості та екологічну безпеку наявності важких металів у біовугіллі, одержуваному з мулу. Сумарні концентрації Cu, Zn, Pb, Cr, Mn та Ni збільшувалися з підвищенням температури піролізу та виходу біовуглецю. Однак було виявлено, що більша частина важких металів існувала в окислювальних та залишкових формах після піролізу, особливо при

600 °С, що призвело до значного зниження їх біодоступності, тобто до зменшення екологічного ризику. Дане дослідження вказує на те, що піроліз є перспективним методом обробки осаду для іммобілізації важких металів у біовугіллі, та підкреслює потенціал мінімізації шкідливого впливу біовугілля завдяки контролю температури піролізу.

Роботи [11–13] присвячені енергетичній ефективності процесу піролізу. У роботі [11] піролізу піддавали висушені осади стічних вод на пілотній установці продуктивністю 300 кг/год. Пірогаз спалювався у топці над камерою піролізу. Було досліджено баланс енергії та маси

для визначення ефективності цього обладнання та кількості теплової енергії у високотемпературних димових газах, які можуть бути використані для висушування мокрого осаду стічних вод або виробництва пари.

У роботі [12] оцінено екологічні та економічні показники технології гідротермального піролізу шламу (ГТП) у порівнянні із спалюванням, вивезенням на полігони та компостуванням. Порівняння виконувалося по впливу на зміну клімату, людську токсичність, витрати, корисне використання та землекористування у китайському місті Хіамен. Було встановлено, що оптимальна пропорція між застосуванням різних технологій становить: 35,9 % – спалювання шламів із вмістом води 80 %; ГТП – 28,9 %; компостування – 25,9 %; вивезення на полігони – 9,3 %. Ці висновки спрямовані для осіб, які приймають рішення, що відповідають особливостям водних та соціально-економічних умов у китайських містах. Висновки щодо наведених пропорцій технологій не є універсальними, їх потрібно сприймати як додатні для конкретного китайського міста. Основний висновок авторів полягає у тому, що гідропіроліз займає менші площі, незначно впливає на довкілля та має економічні переваги порівняно з вивезенням на звалища, спалюванням та компостуванням. До таких висновків слід віднести критично, оскільки, наприклад, економічна перевага вивезення шламів на звалища не викликає сумніву. Викликає сумніви можливість спалювання шламів вологістю 80 %.

Енергетична ефективність процесу переробки ОСВ залежить в основному від вмісту органічних речовин. У роботі [13] з точки зору енергетичної ефективності порівнювалися три процеси: анаеробного зброджування, піролізу,

а також комбінований процес зброджування з наступним піролізом дігестату. Встановлено, що інтеграція піролізу та попереднього анаеробного зброджування може бути найбільш ефективним рішенням для вилучення енергії з осадів стічних вод. Відзначається, однак, що цей комплексний шлях не завжди перевершує дві окремі технології, коли переробляються різні типи шламу. Технологія піролізу демонструвала найнижчу енергоефективність та найбільше навантаження на навколишнє середовище, і тільки відносна частка твердого шламу з леткими речовинами у сумарних твердих тілах (летючі тверді/сумарні тверді), що перевищує 63 %, дала можливість системі генерувати чистий вихід енергії. Інтегрований шлях мав кращу екологічну ефективність та енергоефективність, ніж одиничний піроліз, оскільки попереднє анаеробне зброджування посилювало перетворення органічної речовини шламу на енергію. Коли шлам (летючі тверді/сумарні тверді) перевищував 61 %, інтегрована система експортувала надлишок тепла. Анаеробне зброджування було найкращим серед трьох шляхів, оскільки не вимагало витрат енергії та матеріалів на термічну сушку та піроліз. Цей висновок китайських дослідників викликає неабиякі сумніви, оскільки багатьма іншими дослідженнями підтверджена екологічна недосконалість процесу зброджування та неповне використання енергії органічних речовин, оскільки значна їх частина залишається у дігестаті.

#### **Термокаталітичний риформінг ОСВ.**

У роботах [14, 15] повідомляється про успішне випробування новітнього процесу термокаталітичного риформінгу (ТКР), розробленого та запатентованого компанією Fraunhofer UMSICHT. Процес був випробуваний для переробки лігноцелюлозної біомаси та трьох органічних відходів: дігестатів, паперових шламів та осадів стічних вод – на продукти поліпшеного риформінгом піролізу. Лабораторний реактор ТКР продуктивністю 2 кг/год є шнековим реактором піролізу, з'єднаним з риформером. Метою роботи було порівняння виходу та якості продуктів (біовугілля, біо-нафти та синтез-газу) при умовах піролізу при 400 °С та посткаталітичного риформінгу при 700 °С. Були отримані високоякісні біо-нафти та синтез-газ з усіх чотирьох видів біомаси у порівнянні з традиційним піролізом та швидким піролізом. Вироблене високоокиснене рідке біо-масло мало теплотворну здатність 35,2 МДж/кг з покращеними фізичними властивостями палива, низькою в'язкістю та кислотним числом незалежно від складу використовуваної біомаси. Найбільший вихід

біогазу спостерігався при температурі після риформінгу 750 °С.

**Газифікація ОСВ** є найменш вивченим процесом та ще не отримала практичного застосування. Перевагами газифікації є такі: високі значення ККД при використанні генераторного газу для виробництва електроенергії у двигунах внутрішнього згорання; порівняно низькі температури процесу, що забезпечує низькі значення випаровування важких металів у генераторний газ; високий рівень перетворення органічних речовин осадів у енергію генераторного газу; отримання зольного залишку у вигляді гранул високої міцності, що забезпечує можливість їх прямого використання у будівництві або безпечного депонування [1]. Недоліками процесу є необхідність використання попередньо гранульованого та термічно висушеного осаду та необхідність збагачення повітря киснем для підвищення теплотворної спроможності генераторного газу. Попередні експериментальні дослідження процесу газифікації ОСВ, виконані в Інституті газу НАН України, підтвердили перспективність цієї технології.

**Нові концепції газифікації.** У роботі [16] газифікація розглядається як ключова технологія для використання біомаси, підкреслюється необхідність розроблення передових, економічно ефективних та високоефективних процесів та систем газифікації. Рекомендується в основу нових розроблень покласти інтеграцію процесів та полігенерацію, тобто отримання декількох енергетичних продуктів в одному процесі. Прикладом інтеграції може бути розроблений газогенератор UNIQUE, що об'єднує газифікацію, очищення та кондиціювання газу в одному реакторному агрегаті. Інші пропонувані для розгляду концепції поєднують піроліз та газифікацію або газифікацію та спалювання в окремому контрольованих стадіях.

Новою концепцією, що відповідає напряму полігенерації, може бути виробництво біометану з продуктів газифікації ОСВ. Відбувається швидке зростання інтересу до використання біометану як палива для транспортного застосування. Запропоновано нову концепцію поєднання анаеробного зброджування та газифікації біомаси для отримання біометану [17]. Водень, що утворюється при газифікації біомаси, відокремлюється від синтез-газу в мембранній системі, а потім використовується для модернізації біогазу від анаеробного зброджування. Були проведені симуляції на основі даних реальної експлуатації однієї повномасштабної біогазової установки та однієї установки для газифікації біомаси в повному масштабі з

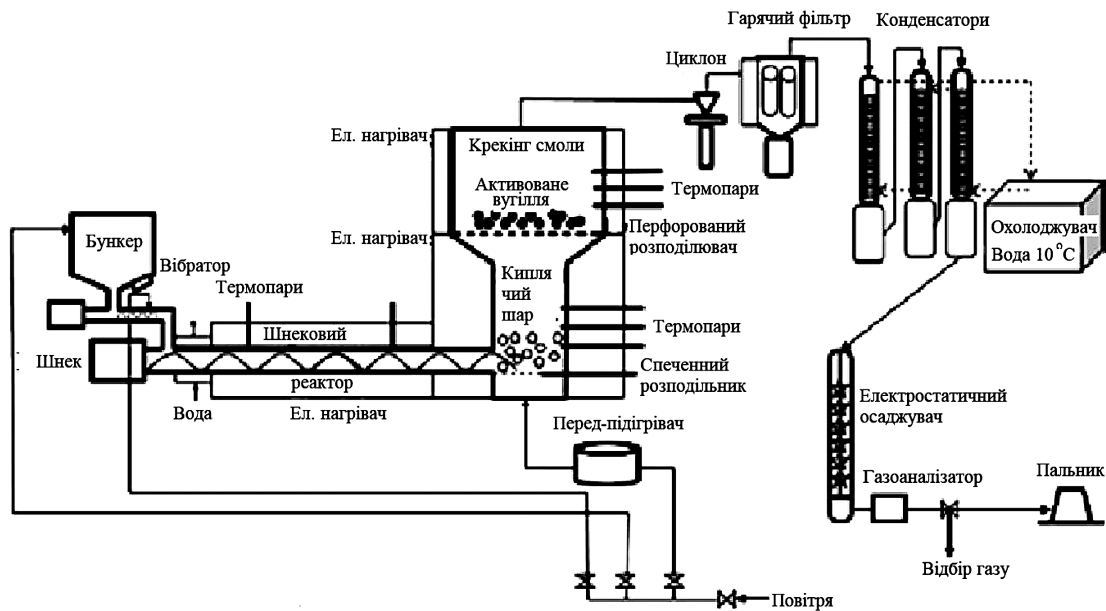


Рис.5. Схема триступеневого реактора газифікації ОСВ.

метою вивчення можливості впровадження нової концепції. Результати показують, що, хоча генерується менше енергії та тепла порівняно з газифікаційною установкою, що призводить до зниження загальної ефективності, може бути отримано набагато більше біометану, ніж у біогазовій установці. Таким чином, нова концепція може досягти більш високої ефективності ексергії. Завдяки зростанню ціни на біометан нова концепція демонструє великий потенціал збільшення доходів. Наприклад, при ціні біометану 1,19 Євро/кг річний дохід може бути збільшений на 5,3 % порівняно із загальним доходом заводу з виробництва біогазу та газифікації.

У роботі [18] розглядається процес спільної газифікації біомаси з вугіллям, в якому знижуються викиди парникових газів. Підкреслюється також висока ефективність процесу газифікації біомаси, що приваблює інтерес на протязі останніх десятиріч. Однак зазначається, що при проектуванні таких виробництв слід приймати до уваги соціальні та екологічні аспекти та враховувати можливість стабільного постачання біомаси для процесу.

Інтерес може становити процес парової конверсії ОСВ при високих температурах дігестату, що утворюється після анаеробного зброджування [19]. Високотемпературна газифікація (конверсія) осадів є процесом, в якому органічні матеріали перетворюються на синтез-газ з високою концентрацією водню. Реакції конверсії вуглецю, вуглеводнів та біомаси з ме-

тою отримання синтез-газу добре вивчені та широко застосовуються у промисловості у виробництві мінеральних добрив та багатьох хімічних речовин. Автори роботи [19] у лабораторному масштабі експериментально досліджували вплив кількості пари на кінетику процесу. Результати показують, що швидкість хімічної реакції може контролюватися для досягнення оптимальних умов експлуатації, що потенційно може зменшити час обробки сировини та споживання пари при максимізації виходу синтез-газу.

Корейські дослідники випробували триступеневий газифікатор нового типу [20], що складається із шнекового реактора, реактора з псевдозрідженим шаром та реактора розкладання смоли (рис.5). Реактор застосовувався для повітряної газифікації висушеного осаду стічних вод та поліетилену для отримання високоякісного генераторного газу з низьким рівнем домішок (смоли, аміаку, сірководню). В експериментах виявилось дуже ефективним використання активованого вугілля у виробництві водню та видаленні смоли. Максимальна концентрація водню у генераторному газі, отриманому з активованим вугіллям, становила приблизно 29 % (об.). Початковий вміст смоли у газі становив 142 мг/нм<sup>3</sup>. Максимальна концентрація водню у газі була приблизно 27 % (об.), а генераторний газ на виході з установки був вільним від смоли. Активоване вугілля регенерували продувкою повітрям на протязі 10 хв.

Серед нових технологій утилізації осадів, що почали розроблятися в останні роки, можна



**Таблиця 2. Приклади спалювання ОСВ спільно з вугіллям та іншими відходами у деяких країнах-членах ЄС**

Країни-члени ЄС	Тип відходів	Тип котла	N, МВт	Е бруutto, МВт	Частка відходів у тепловій потужності, %	Спосіб подачі відходів у котел
Австрія	Мул стічних вод	РШВ	543	246	0,1	
Німеччина*	Мул стічних вод	СШВ	2 × 2465	2 × 920	1,5	Змішування з лігнітом перед розпилюванням
Німеччина	Мул, кістки тварин	РШВ	2100	838	1,0	Змішування відходів з основним паливом перед живильником
Німеччина	Мул стічних вод	СШВ	1370	550	0,1	
Німеччина	Мул, нафтовий кокс	СШВ	1870	824	< 5	
Німеччина	Штучне паливо з відходів(RDF)	РШВ	1528	658	3,9	Змішування відходів з основним паливом перед живильником
Німеччина	Мул, кістки тварин, лігніт	СШВ	1524	500	< 2	Змішування з лігнітом перед розпилюванням
Німеччина	Мул стічних вод	СШВ	1125	474	< 5	
Німеччина	Мул, паливо з ТПВ, кістки	РШВ	887	320	1	
Німеччина	Штучне паливо з ТПВ (RDF)	ЦКШ	80	30	5	
Німеччина	Штучне паливо з ТПВ, паперовий шлам, мул стічних вод	ЦКШ	89	20	< 20	

*Примітка.* Тип основного палива – вугілля, \* – лігніт. РШВ – рідке шлаковидалення; СШВ – сухе шлаковидалення; ЦКШ – циркулюючий киплячий шар. RDF – refuse derived fuel – штучне паливо, виготовлене з горючої складової твердих побутових відходів; N – теплова потужність енергоблоку, E – електрична потужність блоку

відзначити роботи [21, 22], у яких розглядаються процеси прямого зрідження біомаси з метою отримання рідкого біопалива (bio-oil). Вивчаються питання вибору розчинників, впливу виду біомаси, поведінки важких металів у процесі зрідження. Ці та подібні роботи ще не вийшли за межі лабораторних досліджень.

**Спалювання ОСВ.** З точки зору мінімізації витрат на утилізацію та знешкодження ОСВ для України слід розглянути застосування технологій їх спільного спалювання з іншими видами твердого палива у теплових агрегатах, насамперед у топках вугільних ТЕС та цементних печах. У роботі [1] зазначалося, що ферментативна переробка відходів усіх видів економічно не виправдана, а ферментація ОСВ до того ще екологічно небезпечна. Дослідження останніх років показали, що у біогаз поряд з горючими складовими, метаном та іншими газами переходять сильні забруднювачі навколишнього середовища. Так, у пробах біогазу, отриманого зброджуванням стічних вод, що складалася з 60 % комунальних та 40 % виробничих стоків, виявлено 1–100 мкг/м<sup>3</sup> миш'яку та сурми, по 10–1000 мг/м<sup>3</sup> ртуті, телуру, свинцю, олова. Ці метали представлені з'єднаннями, характерними для процесів гниття органічних речовин. Виявлені концентрації багаторазово

перевищують ГДК цих з'єднань. Зокрема, в Росії ГДК ртуті, телуру, свинцю та олова складають 0,0003–0,05 мг/м<sup>3</sup>. Крім того, по даних російських досліджень, концентрації аміаку та сірководню, що містяться у біогазі з метантенків, та осадів, видалених з них після зброджування, перевищують ГДК на відстані 300–500 м від станцій аерації та мулових площадок. Аналіз літературних даних показує, що вартість утилізації 1 т ОСВ в Європі обходиться муніципалітетам у середньому 50 євро, у Південній Кореї – 110 дол. США. Такі суми є завеликими для бюджетів міст України.

Україна приєдналася до Директиви Європейської комісії 2010/75/EU щодо запобігання та контролю за викидами великих промислових установок «Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control». До великих спалювальних установок віднесено установки тепловою потужністю більше 50 МВт, що в еквіваленті умовного палива означає трохи більше 6 т у.п./год. На доручення Європейської комісії для допомоги у досягненні завдань Директиви Об'єднаний дослідницький центр ЄК (Joint Research Centre) підготував перелік найкращих доступних технологій запобігання викидам практично у всіх галузях виробництва

«Найкращі доступні технології відносно документу для великих спалювальних установок» (Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants) [23]. До переліку найкращих технологій віднесено також спільне спалювання осадів стічних вод у котлах ТЕС (waste co-incineration). У роботі [23] наведено 31 приклад спалювання ОСВ у котлах електростанцій у країнах-членах ЄС: Австрії, Німеччині, Фінляндії, Франції, Швеції, Великобританії. У Німеччині у котлах ТЕС спалюється більше 50 % ОСВ. Деякі приклади спільного спалювання ОСВ у Німеччині наведені у табл.2. Доведено, що вугільні установки без проблем можуть використовувати до 5 % зневоднених до 60 % шламів, які мають теплотворну спроможність 4,4 МВт/кг. Для очищення викидних газів від шкідливого компонента ртуті перед електрофільтром впорскують буровугільний кокс та використовують вугільні адсорбери. Степінь очищення від ртуті сягає 75–85 %. Вартість знешкодження ОСВ при сумісному спалюванні зменшується більше ніж у 5 разів порівняно із спеціалізованими установками.

Для умов України можна також пропонувати практично беззбиткове знешкодження ОСВ їх сумісним спалюванням з твердим паливом в обертових цементних печах. Сумісне спалювання у цементних печах практикується у Туреччині, Німеччині. У статті [24] порівнюються екологічні наслідки моно спалювання осаду стічних вод у існуючій камері згоряння киплячого шару та у цементній печі, у якій шлам використовується як вторинне паливо. Показано, що з точки зору здоров'я людини перевагу слід віддати сумісному спалюванню у цементних печах, оскільки залишкові матеріали спалювання у них іммобілізовані виробленими клінкерами.

**Бортницька станція аерації.** Даний огляд має на меті дати чітку перспективу для тих, хто приймає рішення щодо формування екологічно безпечної та стійкої політики утилізації шламу. З цієї точки зору важливо розглянути можливі перспективи доведення до екологічно прийнятної стану експлуатацію найбільшої в Україні Бортницької станції аерації (БСА) під Києвом. Підприємство було введено в експлуатацію у 1965 р. До 1985 р. перероблений мул та стічна вода використовувалися на навколишніх полях як добрива, але було встановлено, що у ґрунтах полів, на яких як добрива використовувалися мули стічних вод, в окремих пробах було зафіксовано аномальний вміст важких металів (Cu, Cr, Zn, Pb та ін.), що у десятки разів перевищував їх ГДК для сільськогосподарських ґрунтів.

Після 1985 р. мул у кількості 12 тис. м<sup>3</sup>/добу вологістю 97,5 % вивозиться на мулові поля для зневоднення. У перерахунку на суху речовину її кількість у свіжому осаді становить приблизно 300 т/добу, або 109500 т/рік. Якщо прийняти, що кількість населення у Києві 3 млн чоловік, то на одну людину припадає 36,5 кг сухої речовини на рік. Це значення повністю укладається в межі, наведені у табл.1. За підрахунками [25], загальна кількість накоплених осадів та мулу на БСА становить 9 млн м<sup>3</sup>.

З метою визначення можливості подовження експлуатації станції до 2024 р. підприємство «Українська геологічна компанія» виконало дослідження екологічних особливостей мулу БСА [26]. Встановлено, що склад та структура мулів неоднорідні по об'єму. У верхній частині вони мають торфоподібну мулисту «шапку», загальна вологість якої змінюється від 37 до 78 % при середньому значенні 62 %. Нижче по розрізу середня вологість в'язкого мулу складає 84 %, а середня вологість рідкого мулу 90 %. Середня вологість придонного шару ущільненого мулу складає 68 %. Вологість верхнього шару мулових покладів змінюється найбільше у залежності від кліматичних умов та подачі (підливу) свіжого мулу на мулове поле. За своєю зольністю торфоподібна мулиста «шапка» змінюється від 44 до 51 % при середньому значенні 46 %, що не відповідає паливним торфам, зольність яких має бути не більше 23 %. Нижче по розрізу середня зольність в'язкого мулу трохи зменшується та складає 43,5 %, а середня зольність рідкого мулу 40 %. Середня зольність придонного шару ущільненого мулу суттєво зростає до 60 %.

Цікаві дані наведені у звіті [26] щодо характеристик свіжого мулу, який надійшов на мулові поля у 2017 р. По своїх енергетичних параметрах він поступається накопиченому мулу. Його загальна волога складає 75,9 %, зольність – 72,5 %. Мул є доволі запісоченим, містить велику кількість пилувато-глинистої фракції. Доля органічної речовини у свіжому мулі порівняно невелика – 23,3 %. Сумарний показник забруднення у пробі свіжого мулу складає 393 од., що відповідає надзвичайно небезпечному рівню забруднення (> 128 од.). Пояснити погіршення енергетичних параметрів свіжого мулу не представляється можливим.

Розглядаючи можливі технології утилізації мулу БСА, автори звіту [26] зверталися до досвіду вибору технологій для Липецької станції аерації, Росія (ЛиА). Порівнювалися найбільш поширені технології: спалювання осадів, компостування, анаеробне зброджування, термічна

сушка та сушка сонячною енергією. Неспроможними були визнані три технології: 1) анаеробне зброджування. Економічно виправдане співвідношення сирого осаду до надлишкового мулу для отримання біогазу, з досвіду зарубіжних компаній, має бути (40 : 60), у Липецьку це співвідношення становить (15 : 80). Низький вихід біогазу був також обумовлений великим віком мулу – 15 діб, та його частковою мінералізацією в аеротенках; 2) термічна сушка внаслідок її високої енергоємності та можливість самозаймання висушеного мулу; 3) сушка сонячною енергією внаслідок необхідності відведення значних територій – до 50 тис. м<sup>2</sup>. З урахуванням місцевих умов для подальшого розгляду були обрані технології спалювання осадів та компостування. Проведено розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат на реалізацію кожної з розглянутих технологій (табл.3).

За даними Української геологічної компанії, висновки з результатів виконаних досліджень з деякими скороченнями такі [26]:

«1. Основною перешкодою використання мулів з мулових полів БСА як органічних добрив та аргументом на користь більш радикальних та капіталомістких технологічних рішень його утилізації, таких як спалювання чи поховання, є аномально високі концентрації важких металів I (Cd, Hg, Pb, Zn) та II (Cr, Cu, Ni) класів небезпеки. Концентрації цих елементів у мулах БСА в 20–100 разів, а то й більше перевищують їх фонові вмісти у ґрунтах району робіт. Використання таких мулів як добрив на сільськогосподарських землях призведе до ... довготривалого забруднення сільськогосподарських земель Бориспільського району важкими металами, яке відбулось ще у 1970-х рр. та зберігається й понині. Це, як наслідок, призводить до забруднення вирощеної на них продукції, що є фактором прямої екологічної дії важких металів на людину.

2. В даний час можна розглядати можливість використання мулів БСА як меліорантів ґрунту для рекультивації земель на звалищах ТПВ, в лісовому господарстві, при упорядкуванні, рекультивації, озелененні міських територій, вирощування декоративних рослин тощо... Цей шлях вимагає, що найменше, біотермічної обробки мулу (компостування, найдешевший метод утилізації) та дотримання нормативних вимог щодо вмісту важких металів, які ... в Україні відсутні, але в країнах ЄС регламентуються широким спектром постанов... Варто зауважити, що таке використання мулів ... включає важкі метали у біологічний кругообіг,

**Таблиця 3. Порівняння капітальних та експлуатаційних витрат при реалізації різних технологічних рішень по утилізації осадів [26]**

Технологія	Капітальні витрати, тис. євро	Експлуатаційні витрати, євро/м <sup>3</sup> осаду
Спалювання осадів	18 125	45,0
Компостування	1 950	7,00
Анаеробне зброджування (отримання біогазу)	7 655	25,00
Термічна сушка	7 875	20,00
Сушка сонячною енергією	5 775	10,00

що має віддалену екологічну дію на довкілля та людину».

У підсумку автори рекомендують «розглянути питання консервації мулових полів після виведення їх із експлуатації» аж до появи зацікавлених інвесторів та удосконалених технологій утилізації мулу.

Розбіжність по показниках вологості та зольності мулу БСА ставить задачу розроблення окремих технологій для різних ділянок по площі та особливо по висоті. Представляється доцільним почати утилізацію накопиченого мулу з верхніх шарів. Враховуючи їх велику зольність, можливо, слід би піддавати їх компостуванню та використовувати для рекультивації земель. Компостування накопичених осадів визнано не тільки економічно привабливою технологією, а й такою, що завдає найменшої шкоди оточуючому середовищу.

У роботі [27] викладені результати дослідження фізико-хімічних властивостей компосту з комунального осаду стічних вод із станції їх очищення. Оцінена можливість використання осадів для упорядкування земель компостом, оскільки він багатий на біогенні елементи: азот та фосфор. Визначали вміст основних макроелементів та важких металів (Zn, Cu, Cr, Cd, Ni, Pb, Hg, Mg, Ca, N, P, K, Na). Було встановлено, що вміст важких металів у компості не перевищує меж, встановлених нормативами. Аналіз результатів тристадійної хімічної екстракції показав, що відкладення після аеробної стабілізації та компостування акумулюють метали (у низхідній послідовності) у фракціях III та II, які практично не погіршують стану екосистеми.

### Висновки

Кількість осадів стічних вод в Україні оцінюється у 900 тис. т, що еквівалентно близько 450 тис. т умовного палива. Використання енергетичного потенціалу осадів доцільно з урахуванням світової тенденції поши-

рення децентралізованого виробництва електроенергії. Технології утилізації осадів мають забезпечувати відсутність негативного впливу продуктів їх перероблення на оточуюче середовище. Розробляються нові технології утилізації осадів, що відповідають цим вимогам: піроліз, гідропіроліз, комбіновані процеси зброження та газифікації, полігенерація, парова конверсія, газифікація сумішей з іншими видами палива, термодаталітичний риформінг, триступенева газифікація. Більшість з цих технологій ще не знайшла промислового використання. Економічно ефективною, прийнятною для умов України технологією утилізації осадів є їх спільне спалювання з іншими твердими паливами та відходами у котлах ТЕС та цементних печах. Для об'єктів децентралізованої енергетики слід надати перевагу процесам газифікації або піролізу ОСВ. Для утилізації накопичених осадів прийнятною є технологія компостування.

### Список літератури

1. Карп І.М., П'яних К.Є., Нікітін Є.Є. Проблема утилізації та знешкодження мулових осадів міських стічних вод та шляхи її вирішення. *Енерготехнології и ресурсосбережение. 2017. № 2. С. 25–38.*
2. Werle S. Thermal treatment of sewage sludge within a circular economy perspective : A Polish case study. *6th Intern. conf. on Sustainable Solid Waste Management NAXOS2018. 13–16 June 2018.* — <http://www.naxos2018.uest.gr>.
3. Протасов В.Ф., Молчанов А.В. Экология, здоровье и природопользование в России. М. : Финансы и статистика, 1995. 528 с.
4. Національна енергетична стратегія України «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
5. Карп І.М. Основні тенденції розвитку енергетики України. *Технічна електродинаміка. 2018. № 2. С. 55–62. DOI: <http://doi.org/10.15407/techned2018.02.055>*
6. Glatzer A., Schild H. Operational Experiences from Austrias First Medium Sized Sewage Sludge Mono-Incineration Plant in Grosswilfersdorf Austria. *Proceedings of 4th Central European Biomass Conference. Jan. 15–18, 2014. Graz, Austria.*
7. Uddin M., Techato K., Taweekun J., Rasul M., Mahlia T., Ashrafur S. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies. 2018. Vol. 2. doi:10.3390/en11113115.*
8. [Презентація:] «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. Business Management & Consultancy. 2017. С. 41.* — <http://www.plusdg.com>.
9. Kumar M., Kumar P., Chauhan D., Jobal A. Pyrolysis of Biomass. *Iconic Research and Engineering Journals. March 2018. Vol. 1, Iss. 9. pp. 54–59.*
10. Jin J., Li Y., Zhang J., Wu S., Liang P., Zhang J., Wong M.H., Wang M., Shan S., Christie P. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials. 2015. Vol. 320. pp. 417–426.* — <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>
11. Liu X., Chang F., Wang C., Jin Z., JingWu J., Zuo J., Wang K. Pyrolysis and subsequent direct combustion of pyrolytic gases for sewage sludge treatment in China. *Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 128. P. 464–470.* — <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.091>.
12. Lishan X., Tao L., Yin W., Zhilong Y., Jiangfu L. Comparative life cycle assessment of sludge management : A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 192. pp. 354–363.* — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.171>.
13. Li H., Kai., Feng K. Life cycle assessment of the environmental impacts and energy efficiency of an integration of sludge anaerobic digestion and pyrolysis. *Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 195. P. 476–485.* — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.259>
14. Neumann J., Meyer J., Ouadi M., Apfelbacher A., Binder S., Hornung A. The conversion of anaerobic digestion waste into biofuels via a novel Thermo-Catalytic Reforming process. *Waste Management. 2016. Vol. 47, Part A. P. 141–148.* — <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.001>.
15. Conti R., Jäger N., Neumann J., Apfelbacher A., Daschner R., Hornung A. Thermocatalytic Reforming of Biomass Waste Streams. *Energy Technology. January 2017. Vol. 5. P. 104–107.*
16. Heidenreich S., Foscolo P. New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science. 2015. Vol. 46. P. 72–75.* — <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.6.002>.
17. Li H., Larsson E., Thorin E., Dahlquist E., Yu X. Feasibility study on combining anaerobic digestion and biomass gasification to increase the production of biomethane. *Energy Conversion and Management. August 2015. Vol. 100. P. 212–219.* — <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.007>.
18. Farzad S., Mandegari M., Georgens J. A critical review on biomass gasification, co-gasification and their environmental assessment. *Biofuel Research Journal. 2016. Vol. 3, № 4. P. 483–495.* — <https://doi.org/10.18331/brj2016.3.4.3>.
19. Lee U., Dong J., Chung J. Experimental investigation of sewage sludge solid waste conversion to syngas using high temperature steam gasification. *Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 158. P. 430–436. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.12.081*

20. Jeong Y., Kang B., Kim J. Air gasification of dried sewage sludge and polyethylene using a new type three-stage gasifier: Effects of activated carbon used as tar removal additive and in-situ regeneration of activated carbon // Звіт Департаменту інженерії доквілля Сеульського університету (Department of Environmental Engineering, University of Seoul) по контракту No. 20153030091340 з Корейським інститутом оцінки та планування енергетичних технологій (Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning). 2018. С. 8. — [http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/NAXOS2018\\_Jeong\\_etal.pdf](http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/NAXOS2018_Jeong_etal.pdf)
21. Huang H., Yuan X. Recent progress in the direct liquefaction of typical biomass. *Progress in Energy and Combustion Science*. DOI:10.1016/j.precs.2015.01.003
22. Melero J.A., Sanchez-Vazquez R., Vasiliadou I.A., Martinez F., Bautista L.F., Iglesias J., Morales G., Molina R. Municipal sewage sludge to biodiesel by simultaneous extraction and conversion of lipids. *Energy Conversion and Management*. Oct. 2015. Vol. 103. P. 111–118. — <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.045>
23. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. *Joint Research Centre Science Hub*. 2017. P. 940. doi:10.2760/949.
24. Abusöğlü A., Özahi A., Kutlar I., Al-jaf H. Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142, Part 2. P. 1684–1692. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.121>
25. Бондар О.І., Лозовицький П.С., Машков О.А., Лозовицький А.П. Екологічний стан накопичених осадів стічних вод м. Києва // Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління. 2016. С. 17. — <http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/data/bis3/himichniy-sklad-stichnih-vod-m.-kiva.pdf>
26. Екологічні особливості мулів стічних вод Борницької станції аерації: Звіт Державного підприємства «Українська геологічна компанія» за договором № 031704-УГК від 17.08.2017 р. між ДП «Інститут «Київінжпроект» та ДП «Українська геологічна компанія». Київ, 2018. Т. 2. 121 с.
27. Ignatowicz K. The impact of sewage sludge treatment on the content of selected heavy metals and their fractions. *Environmental Research*. July 2017. Vol. 156. P. 19–22. — <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.035>

Надійшла до редакції 25.03.19

**Карп І.Н.**, акад. НАН України, докт. техн. наук, проф.,  
**Пьяных К.Е.**, докт. техн. наук, **Пьяных К.К.**  
 Інститут газу НАН України, Київ  
 ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: karpkiev@gmail.com

## Утилизация осадков сточных вод

Технологии утилизации осадков сточных вод должны отвечать двум требованиям: использованию энергетического потенциала и отсутствию негативного влияния на окружающую среду продуктов их переработки. Разрабатываются новые технологии утилизации осадков, соответствующие этим требованиям: пиролиз, гидропиролиз, комбинированные процессы брожения и газификации, полигенерация, паровая конверсия, газификация смесей с другими видами топлива, термokatалитический риформинг, трехступенчатая газификация. Большинство из этих технологий еще не нашло промышленного использования. Энергетический потенциал свежих осадков в Украине оценивается в 446 тыс. т условного топлива. Его использование для производства электрической и тепловой энергии и вторичных жидких и твердых топлив целесообразно как соответствующего мировой тенденции развития децентрализованной энергетики. Экономически эффективной, приемлемой для условий Украины технологией утилизации осадков является их совместное сжигание с другими твердыми топливами и отходами в котлах ТЭС и цементных печах. Для объектов децентрализованной энергетики следует отдать предпочтение процессам газификации или пиролиза осадки сточных вод. Для утилизации накопленных осадков приемлемой является технология компостирования. *Библ. 27, рис. 5, табл. 3.*

**Ключевые слова:** осадки сточных вод, утилизация, технологии, эффективность, экология.

**Karp I.M.**, Academician of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, **Pyanykh K.Ye.**, Doctor of Technical Sciences, **Pianykh K.K.** **The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**  
39, Degtyarivska Str. 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail:karpkiev@gmail.com

## Utilization of Sewage Sludge

Sewage sludge utilization technologies must meet two requirements: the use of energy potential and ensuring that the products of their processing are not negatively affected by the environment. New technologies for the disposal of sediments that meet these requirements are being developed: pyrolysis, hydro pyrolysis, combined processes of fermentation and gasification, polygeneration, steam conversion, gasification of mixtures with other fuels, thermocatalytic reforming, three-stage gasification. Most of these technologies have not yet been commercialized. The energy potential of «fresh» sediments in Ukraine is estimated at 446 thousand tons of conditional fuel. Its use for the electricity production and thermal energy and secondary liquid and solid fuels is appropriate as being consistent with the global trend of decentralized energy development. The economically efficient, acceptable for Ukrainian conditions is the technology used to dispose of sediment, is their joint combustion with other solid fuels and waste in boilers of power stations and in cement kilns. For objects of decentralized energy, it should be preferred to the processes of gasification or pyrolysis of sewage sludge. Composting technology is acceptable to dispose of accumulated precipitates. *Bibl. 27, Fig. 5, Tab. 3.*

**Key words:** sewage sludge, utilization, technology, efficiency, ecology.

### References

1. Karp I.M., Pyanykh K.Ye., Nikitin Ye.Ye. [Problem of sewage sludge utilization and neutralization and a ways of its decision]. *Energotekhnologii i resursoberezhnie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 2. pp. 25–38. (Ukr.)
2. Werle S. Thermal treatment of sewage sludge within a circular economy perspective : A Polish case study. *6th Intern. conf. on Sustainable Solid Waste Management NAXOS2018*. 13–16 June 2018. — <http://www.naxos2018.uest.gr>.
3. Protasov V.F., Molchanov A.V. [Ecology, health and environmental management in Russia]. Moscow : *Finansy i statistika. [Finance and statistics]*, 1995. 528 p. (Rus.)
4. [National energy strategy of Ukraine «Security, energy efficiency, competitiveness» : Order of Cabinet of Ministers of Ukraine on August 18, 2017. № 605-o]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
5. Karp I.M. [Main direction of development of energy of Ukraine]. *Technichna elektrodynamika*. 2018. No. 2. pp. 55–62. DOI: <http://doi.org/10.15407/techned2018.02.055> (Ukr.)
6. Glatzer A., Schild H. Operational Experiences from Austrias First Medium Sized Sewage Sludge Mono-Incineration Plant in Grosswilfersdorf Austria. *Proceedings of 4th Central European Biomass Conference*. Jan. 15–18, 2014. Graz, Austria.
7. Uddin M., Techato K., Taweekun J., Rasul M., Mahlia T., Ashrafur S. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies*. 2018. Vol. 2. doi:10.3390/en11113115.
8. Presentation: «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. Business Management & Consultancy*. 2017. P. 41. — <http://www.plusdg.com>.
9. Kumar M., Kumar P., Chauhan D., Iobal A. Pyrolysis of Biomass. *Iconic Research and Engineering Journals*. March 2018. Vol. 1. Iss. 9. pp. 54–59.
10. Jin J, Li Y., Zhang J., Wu S., Liang P., Zhang J., Wong M.H., Wang M., Shan S., Christie P. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 320. pp. 417–426. — <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>
11. Liu X., Chang F., Wang C., Jin Z., JingWu.J., Zuo J., Wang K. Pyrolysis and subsequent direct combustion of pyrolytic gases for sewage sludge treatment in China. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 128. P. 464–470. — <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.091>.
12. Lishan X., Tao L., Yin W., Zhilong Y., Jiangfu L. Comparative life cycle assessment of sludge management : A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*. August 2018. Vol. 192. pp. 354–363. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.171>
13. Li H., Kai., Feng K. Life cycle assessment of the environmental impacts and energy efficiency of an integration of sludge anaerobic digestion and pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 195. P. 476–485. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.259>

14. Neumann J., Meyer J., Ouadi M., Apfelbacher A., Binder S., Hornung A. The conversion of anaerobic digestion waste into biofuels via a novel Thermo-Catalytic Reforming process. *Waste Management*. 2016. Vol. 47, Part A. P. 141–148. — <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.001>.
15. Conti R., Jäger N., Neumann J., Apfelbacher A., Daschner R., Hornung A. Thermocatalytic Reforming of Biomass Waste Streams. *Energy Technology*. January 2017. Vol. 5. P. 104–107.
16. Heidenreich S., Foscolo P. New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. Vol. 46. P. 72–75. — <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.6.002>.
17. Li H., Larsson E., Thorin E., Dahlquist E., Yu X. Feasibility study on combining anaerobic digestion and biomass gasification to increase the production of biomethane. *Energy Conversion and Management*. August 2015. Vol. 100. P. 212–219. — <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.007>.
18. Farzad S., Mandegari M., Georgens J. A critical review on biomass gasification, co-gasification and their environmental assessment. *Biofuel Research Journal*. 2016. 3 (4). pp. 483–495. — <https://doi.org/10.18331/brj2016.3.4.3>.
19. Lee U., Dong J., Chung J. Experimental investigation of sewage sludge solid waste conversion to syngas using high temperature steam gasification. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 158. pp. 430–436. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.12.081
20. Jeong Y., Kang B., Kim J. Air gasification of dried sewage sludge and polyethylene using a new type three-stage gasifier : Effects of activated carbon used as tar removal additive and in-situ regeneration of activated carbon. [Report of Department of Environmental Engineering, University of Seoul on contract No. 20153030091340 with Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning]. 2018. P. 8. — [http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/NAXOS2018\\_Jeong\\_etal.pdf](http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/NAXOS2018_Jeong_etal.pdf)
21. Huang H., Yuan X. Recent progress in the direct liquefaction of typical biomass. *Progress in Energy and Combustion Science*. DOI:10.1016/j.pecs.2015.01.003
22. Melero J.A., Sanchez-Vazquez R., Vasiliadou I.A., Martinez F., Bautista L.F., Iglesias J., Morales G., Molina R. Municipal sewage sludge to biodiesel by simultaneous extraction and conversion of lipids. *Energy Conversion and Management*. Oct. 2015. Vol. 103. P. 111–118. — <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.045>
23. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. *Joint Research Centre Science Hub*. 2017. P. 940. doi:10.2760/949.
24. Abusöglu A., Özahi A., Kutlar I., Al-jaf H. Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142, Part 2. P. 1684–1692. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.121>.
25. Bondar O.I., Lozovitsky P.S., Mashkov O.A., Lozovitsky A.P. [Ecological status of accumulated Kyiv sewage sediments. State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management]. 2016. P. 17. — <http://cgo-sreznvskyi.kiev.ua/data/bis3/himichniy-sklad-stichnih-vod-m-kiva.pdf> (Ukr.)
26. [Ecological features of sewage muds waste at Bortnitskaya aeration station : Report of the State Enterprise «Ukrainian Geological Company» under the agreement No. 031704-UGK dated August 17, 2017 between the State Enterprise «Institute «Kievinzproekt» and the State Enterprise «Ukrainian Geological Company»]. Kiev, 2018. Vol. 2. 121 p. (Ukr.)
27. Ignatowicz K. The impact of sewage sludge treatment on the content of selected heavy metals and their fractions. *Environmental Research*. July 2017. Vol. 156. P. 19–22. — <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.035>

Received March 25, 2019