

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ISSN 1562-8965 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy. 2017, 3(50):60-67
doi: <https://doi.org/10.15407/page2017.03.060>

УДК 621.3.11.22

Л.О. КЕСОВА^{1,2}, д-р техн. наук, професор, **Г.В. КРАВЧУК¹**

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

² Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ УТИЛІЗАЦІЇ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ КОТЛІВ

В ЄС, США та ряді розвинутих країнах світу зола та шлак електростанцій розглядається як техногенна сировина для багатьох галузей промисловості. Системи пневмозолошлаковидалення є невід'ємною складовою технологічного процесу вугільних електростанцій з утилізацією відходів до 92%. В Україні застосовуються системи гідрозолошлаковидалення і, як наслідок, зола та шлак втрачають свої споживчі цінності щодо корисного використання, а їх накопичення на золовідвалах призводить до проблем землевідведення, забруднення ґрунту, водойм, атмосфери, запилення територій, можливості катастрофічного прориву огороження дамб. Надано рекомендації для українських електростанцій щодо вибору обладнання та технологій сухих способів видалення золи та шлаку, які отримали позитивну апробацію в світі.

К л ю ч о в і с л о в а: зола, шлак, відходи, системи пневмо- та гідрозолошлаковидалення, пневмотранспорт, установки вакуумні, напірні, комбіновані, щільнофазні системи, насоси, повітродувні пристрої.

Зменшення викидів забруднюючих речовин об'єктами теплової електроенергетики України є одним з міжнародних зобов'язань України в рамках договору про приєднання до Енергетичного Співтовариства Європейського Союзу. Україна як член Енергетичного Співтовариства повинна розробити відповідні програми послідовного зменшення сукупного річного обсягу викидів із великих установок для спалювання палива і дотримуватися граничних значень викидів, встановлених Директивами 2001/80/ЄС та 2010/75/EU [1, 2]. Для забезпечення своїх зобов'язань Україна має скористатися успішним досвідом європейських країн (Німеччині, Польщі), в іншому разі Україна буде змушена імпортувати електроенергію, зменшивши власне вироб-

ництво, або відмовитися від виконання Директив [3].

Вугілля є головним джерелом енергоресурсів паливно-енергетичного комплексу України. Внаслідок його спалювання на золовідвалах електростанцій накопичилось більше 100 млн т золошлакових відходів (далі – ЗШВ), які створюють проблему землевідведення та негативно впливають на навколишнє середовище (забруднення ґрунту, водойм, атмосфери, запилення територій, можливість катастрофічних наслідків внаслідок прориву огороження дамб) [4].

Статтею 18 Постанови Верховної Ради України від 05.03.98 № 188/98-ВР «Основні напрямки державної політики України в галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки» [5] передбачено здійснення програм ути-

© Л.О. КЕСОВА, Г.В. КРАВЧУК, 2017

лізації твердих відходів (золи, шлаків, шлаків, пилу) для потреб будівельної індустрії, що, на жаль, і досі не виконано.

У країнах світу золошлакові відходи теплових електростанцій (далі – ТЕС) – це комерційний товар, що утилізується (ЄС – 92%, Китаї – 65%, Індії – 50%, США – 41%) з отриманням економічних та екологічних переваг. В Україні утилізація ЗШВ знаходиться на рівні 5% [6]. У США щорічне використання 31 млн т ЗШВ зменшує на 28 млн м² площі звалищ; заощаджує 620 млн дол. США витрат на захоронення відходів; забезпечує 150 млн дол. США прибутку від продажу ЗШВ; знижує на 7 млн т викиди CO₂ за рахунок використання 10,4 млн т легкої золи у виробництві бетону, цементу, залізобетонних виробів [7].

Утилізація золи в сухому вигляді є невід’ємною складовою технологічного процесу вугільних ТЕС держав Європейського союзу, США та інших промислово розвинутих країн світу, що виконують норми та вимоги безпеки виробництва та екології [1].

На діючих ТЕС України для видалення золи та шлаку в основному застосовують технологію гідрозолошлаковидалення (далі – ГЗШВ), що при існуючих цінах на землю, воду та електроенергію економічно не виправдовується (витрати на водяні насоси, трубопроводи, обладнання для очищення води тощо). Тому тепла енергетика України повинна зазнати суттєвих перетворень, пов’язаних як з роботою ТЕС, так і з утилізацією відходів від спалювання твердого палива та вжити відповідних заходів для встановлення систем видалення золи та шлаку з метою їх утилізації та зменшення впливу на довкілля.

Системи пневмозолотранспорту дуже різноманітні і вибрати їх для впровадження нелегко. Адже, золу збирають на ТЕС з елементів котла: з економайзера – 5–10%, повітряпідігрівача – 2–5%; поду топки – 10–15%; 1-го і 2-го полів електрофільтра – 75–80%, димової труби – менше 1% [8]. Зола відрізняється своєю щільністю та дисперсністю. Для її транспортування необхідно забезпечити відповідні умови руху частинок у системі

пневмотранспорту. Внаслідок цього системи поділені:

– за характером транспортування на три групи: **1** – гравітаційний транспорт псевдозрідженого (аерованого) шару золи в аерожолобах (рухається по нахилу аерожолоба подібно воді в каналі); **2** – транспорт псевдозрідженої або частково аерованої золи насосними установками (за допомогою спеціальних форсунок або повітряпроникних перегородок); **3** – транспорт частинок зрідженої золи в трубопроводі потоком повітря з необхідною швидкістю (для тонкодисперсної золи з електрофільтрів – 10–12 м/с; крупної золи з економайзера і повітряпідігрівача – 13–16 м/с; транспортування з низькою швидкістю – 5–8 м/с в незваженому стані відноситься до режиму транспортування в щільній фазі) [8, 9].

– за способом створення в трубопроводі різниці тиску вентиляторами, повітродувками, компресорами на: вакуумні (усмоктувальні), напірні (нагнітальні) і комбіновані (вакуумно-напірні). Напірні установки, в свою чергу, розділені на низько – до 0,1 бар, середнє – до 1 бар та високонапірні – до 8 бар. Прикладом яких є пневмотранспортні системи транснаціональної компанії FLSmidth (рис.1), компанії Mactenn Systems Limited (ТОВ «Укрелектросервіс»), ТОВ «КВАРЦ Групп», фірми Clyde Bergemann (ТОВ «Теплотех») та ін. [9–14];

– за концентрацією твердої фази в потоці на: низькоконцентрований транспорт при відношенні об’єму повітря до об’єму золи $V_1/V_2 > 100$ або у масовому відношенні – 0,1–5,0 кг/кг; середньоконцентрований – $V_1/V_2 = 25/100$ або 15/10 кг/кг; висококонцентрований – $V_1/V_2 < 25$ або 10–400 кг/кг [10].

Для всіх систем пневмотранспорту характерне переміщення твердих частинок за умови переважного впливу на їх рух гравітаційного поля твердої фази, щільність якої в тисячу разів більша за щільність повітря. Сучасною тенденцією є транспортування висококонцентрованої золи.

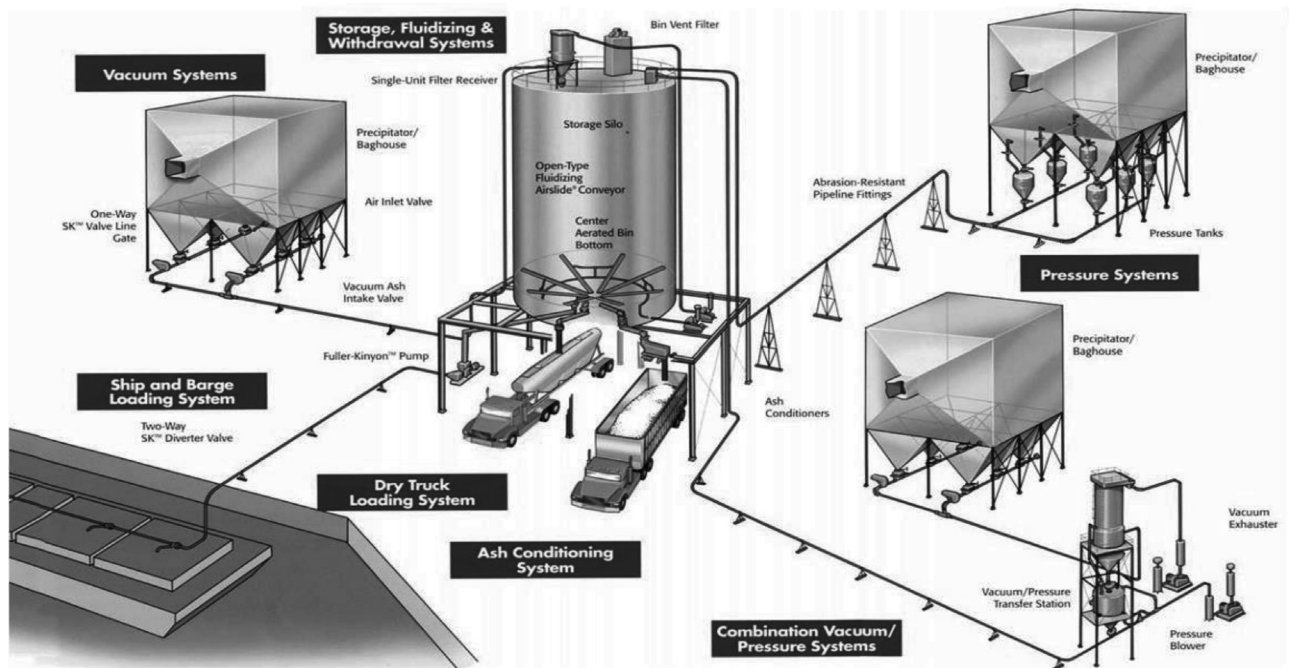


Рис. 1. Пневмотранспортні системи компанії FL Smidth

У вакуумній системі вакуум може створюватися паровими ежекторами, водокільцевими вакуум-насосами або високонапірними вентиляторами, що розміщуються в кінці трубопроводу та створюють тиск 0,8–0,9 бар. Це обмежує дальність транспортування до 200 м і концентрацію твердої фази в потоці. В такій системі на транспорт 1 т золи витрачається 50–100 кг повітря при швидкості потоку в золопроводах близько 20 м/с; витрата електроенергії на вакуум-насоси становить 10–12 кВт · год [9].

Порівняння систем фірми Clyde Bergemann за фазою щільності транспортування матеріалу наведено в табл. 1 [15].

У системах пневмозолотранспорту за напірною схемою повітрядувні пристрої розміщуються на початку трубопроводу, створюючи надлишковий тиск до 8 бар, що дозволяє здійснювати транспортування з максимально можливими концентраціями на відстань з 75 до 2000 м двокамерними, пневмокамерними, пневмогвинтовими, струминними або пневмоімпульсними насосами.

Низьконапірні системи транспортують золу у псевдозрідженому стані аерозолобами,

особливостями яких є: низькі швидкості транспортування, що зменшують енергетичні витрати при експлуатації та знос обладнання (арматури, трубопроводів, колін); можливість безперервного транспортування без пульсацій; простота повторного запуску системи; однак, складність монтажу та велика кількість повітропроводів.

У високонапірній системі зола транспортується в щільній фазі компресорними установками, до особливостей яких відносяться високі початкові та кінцеві швидкості транспортування висококонцентрованої пилоповітряної суміші до 200 кг/кг, значні енергетичні витрати, пульсаційні режими транспортування, конструктивна складність нагнітачів, значний знос обладнання.

Комбіновані вакуумно-напірні установки об'єднують в собі особливості обох систем і можуть застосовуватись як перевантажувачі золи з насипу, так і транспортування її на значні відстані при високих концентраціях.

Перспективним способом пневмотранспорту на значні відстані є імпульсне витиснення шару золи повітрям із обмеженої порожнини та поршневе переміщення її по

Таблиця 1 – Порівняння пневмотранспортних систем за фазою щільності фірми Clyde Bergemann [15]

Показник	Параметр систем		
	низької щільності	середньої щільності	щільнофазні
Тиск, бар	<1	1–2	3–7
Швидкість, м/с	15–30	8–15	2–8
Відстань, км	0,5–1	1–1,5	<3
Концентрація твердої фази в потоці, кг/кг	0,1–5,0	5–10	200
Продуктивність, т/г	<100	<240	<100
Фазовий склад матеріалу	Різнорідний, суміші	Зольний залишок, розмелена топкова зола та вапняк	Зола, розмелений вапняк, гранулят, гіпс та ін.
Переваги	Висока надійність	Низький знос та експлуатаційні витрати, помірні швидкості	Незначний знос, сполучення високої надійності, мінімальних енерговитрат та довготривалий термін експлуатації
Недоліки	Висока витрата повітря, знос трубопроводу на великих швидкостях	Обмеженість дальності транспортування	Необхідність глибоких знань процесу та характеристик матеріалів
Оптимальне застосування	При значному розкиді розмірів, форми або щільності частинок золи для вакуумних та напірних систем	Для широкого спектра, де необхідно транспортувати грубий гранулят з невеликою швидкістю та високою продуктивністю	Транспортування в щільній фазі для високонапірних систем

трубопроводах [14]. Особливістю цієї технології є використання коротко-часового та ударно-хвильового впливу потужним імпульсним струменем повітря, який створюється спеціальним пневмоімпульсним генератором з клапаном поршневого типу. Продуктивність технології залежить від діаметра трубопроводу та частоти пневмоімпульсів. Впродовж декількох секунд камера генератора заповнюється стислим повітрям і за доли секунди викидає повітря у вигляді потужних імпульсних струменів. Така технологія забезпечує транспортування золи в щільній фазі, максимальну масову концентрацію аеросуміші в повітряному потоці, зниження швидкості транспортування до 5 м/с, зменшення абра-

зивного зносу трубопроводів та енерговитрат. Дальність транспортування – більш 1000 м.

При виборі системи пневмозоловидалення слід врахувати, що всі вони мають обмеження при масовій концентрації матеріалу в потоці (μ), максимально можливої втраті тиску (ΔP_{\max}), дальності транспортування (L_{\max}) та продуктивності (m_{\max}) (табл.2) [8].

Енергоефективні та екологічно чисті технології «сухого» видалення шлаку можна поділити на «напівсухі» та «сухі» варіанти. При виборі варіанта враховують такі критерії, як: доступність водокористування (для транспортування та утилізації); фізичні обмеження площі; кількість резервуарів та силосу; термін служби та вартість обладнання; витрати на

Таблиця 2 – Параметри транспортування у систем пневмозоловидалення

Система пневмозоловидалення	Параметр транспортування			
	μ , кг/кг	ΔP_{\max} , бар	L_{\max} м	m_{\max} т/год
Вакуумний транспортер	20	0,5	200	100
Аерожолоб	300	0,05	100	400
Струминний насос	5	0,2	75	5
Роторний живильник	30	0,75	150	40
Пневмогвинтовий насос	80	1,5	80	200
Пневнокамерний насос	200	6,0	2000	150
Ерліфт	25	0,5	100	100
Пневноімпульсний насос	200	0,05	1500	150

Таблиця 3 – Порівняння систем видалення та транспорту шлаку компаній UCC та CBPG

Найменування витрат та необхідні умови впровадження систем		Найменування системи транспорту донної золи (шлаку)				
		«напівсухої» технології систем UCC		«сухої» технології		
		Re-Circulation Systems	SFC	PAX система UCC	VAX система UCC	DRYCON система CBPG
Витрати на проектування, обладнання, та установку (дол. США млн)		9,5	3,5	7	6	~4,6
Тривалість будівництва, місяців		6	до 3	4	3,5	до 3
Термін освоєння нової установки, місяців		9	9	12	12	6
Місце для розміщення	Котельного коридору для виходу механічного конвеєра	не потрібно	потрібно	не потрібно	потрібно	потрібно
	Площа під котлом, м ²	6500	1500	1500	1000	1000
Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування	Насоси	потрібно	потрібно	не потрібно	не потрібно	не потрібно
	Компресори/вентилятори	не потрібно	не потрібно	потрібно	потрібно	потрібно
	Конвеєрні лінії	не потрібно	потрібно	не потрібно	потрібно для вторинного конвеєра	потрібно
	Дробарки, шт.	3 (існуючі)	1	3	1	1
	Трубопровідне транспортування шлаку	потрібно	не потрібно	потрібно	не потрібно	не потрібно
Витрата води	Підживлюючої, л/хв.	379	189,5	не потрібно	не потрібно	не потрібно
	Охолоджуючої, л/хв.	1516	1516	не потрібно	не потрібно	не потрібно
	Зберігання води (рециркуляції), л/хв.	9475	не потрібно	не потрібно	не потрібно	не потрібно
Споживання потужності	Насосів, кВт	441,6	36,8	не потрібно	не потрібно	не потрібно
	Компресор/вентилятор, кВт	не потрібно	не потрібно	147,2	36,8	256,5
	Управління обладнанням, кВт	36,8	73,6	36,8	55,2	

встановлення та експлуатацію установки (власні потреби); конструкцію топки котла («рідке», «сухе» шлаковидалення); характеристики шлаку (фізичні, хімічні).

В світі провідними компаніями систем по видаленню та транспортуванню золошлакових відходів є United Conveyor Corporation (UCC) та Clyde Bergemann Power Group (CBPG). Системи UCC включають технології «напівсухого» варіанта – гідравлічну систему рециркуляції (Re-Circulation Systems) і з підводним скребковим конвеєром SFC (Submerged Flight Conveyor) та «сухого» варіанта – вібраційну VAX (Vibratory Ash Extractor) і пневматичну PAX (Pneumatic Ash Extractor) [16,17]. Порівняння систем видалення та транспорту шлаку компаній UCC (Re-Circulation Systems, SFC, PAX, VAX) та CBPG

(DRYCON) наведено в табл. 3 [18, 19].

«Напівсухий» варіант передбачає зволоження золошлаків до 10% до пухко-сипучого стану з подальшим брикетуванням або грануляцією. При транспортуванні та складуванні зберігається їх однорідність. В «сухому» варіанті процес видалення і складування аналогічний технології штабелювання з пошаровим укладанням маси на складі [20]. Золошлаки в штабелі доступні для утилізації, особливо за наявності транспортних шляхів. Найбільшу перевагу має грануляція золошлаків з подальшим складуванням у вигляді гранул, які є універсальним продуктом широкого спектра застосування. Схему використання золи та шлаку в будівельній галузі наведено на рис. 2 [21].

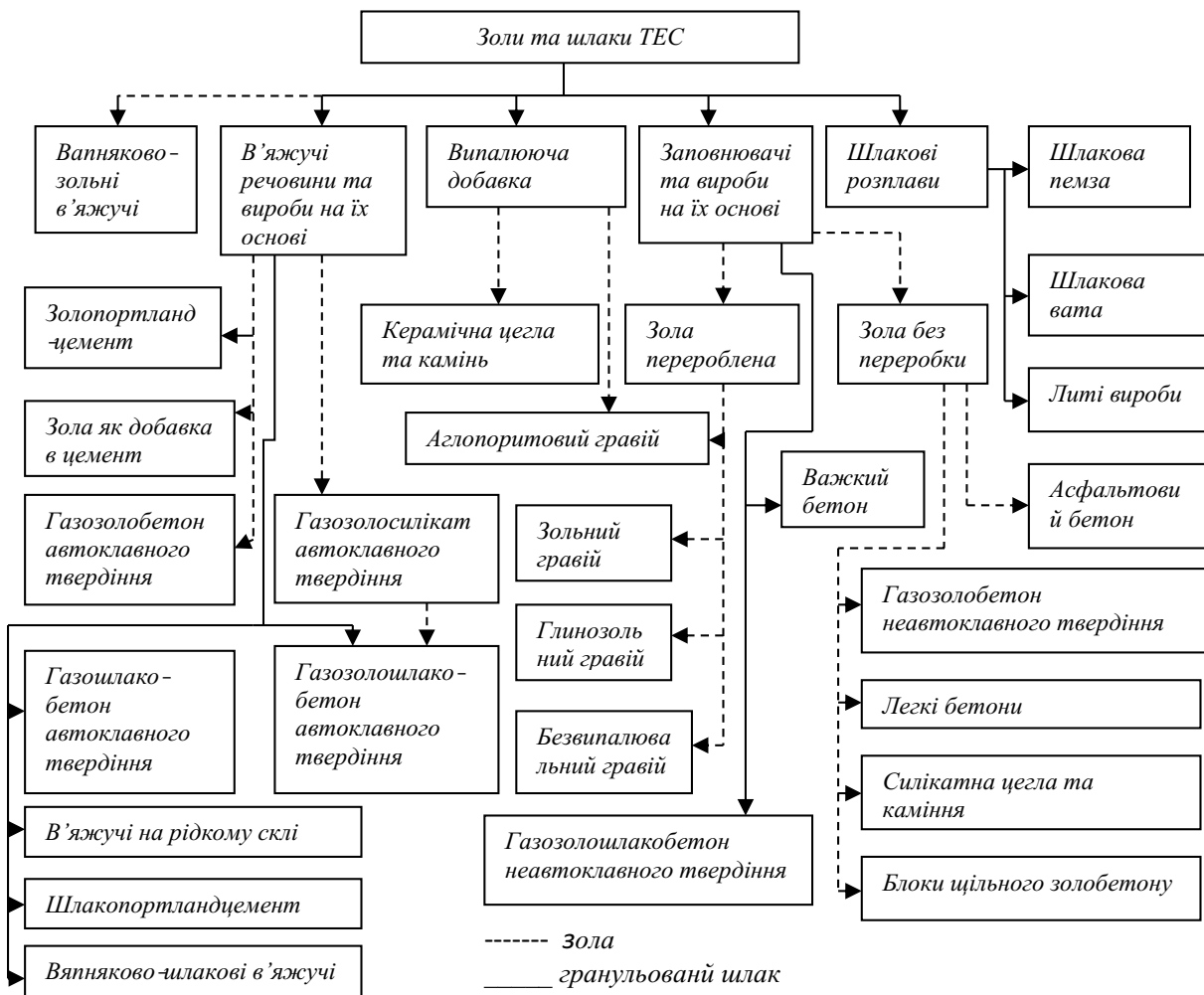


Рис.2. Схема використання золи та шлаку ТЕС в будівельній галузі

Наступним етапом розвитку розглянутих систем золошлаковидалення є системи повернення частини золи та шлаку на допалювання в топку котла. До таких систем відносять систему з комбінованою технологією MAC (Magaldi Ash Cooler)+ MAR (Magaldi Ash Recycling) компанії Magaldi Power S.p.A. Сухий шлак разом із золою електрофільтра змішується з вугіллям перед вуглерозмелючими млинами та подається на допалювання в котел. Така система введена на електростанції Fiume Santo (Італія) та інших [22, 23]. Щоб мати можливість використання сухого шлаку та золи на виробництві будівельних матеріалів, необхідно в ЗШВ попередньо зменшити вміст вуглецю. Класифікація золи-виносу по класу 80–100 мкм дозволяє знизити вміст вуглецю в золі з 10–30% до 5%. Ефективними методами видалення вуглецю є флотаційне збагачення із застосуванням реагентів, що сприяють більш повному (на 70–80%) переходу вуглецю в пінний продукт, а також електростатична сепарація, що дозволяє знизити вміст вуглецю в золі приблизно до 2%. Отриманий таким чином шлак широко використовується для виготовлення: бетону і виробів із нього, добавки в цемент для клінкеру, сипучого наповнювача, дорожньої основи, гіпсових панелей та тощо [24].

ВИСНОВКИ

1. Основним критерієм вибору систем видалення золи та шлаку вугільних електростанцій є вимоги до якості золошлакових відходів, що відвантажуються споживачам.

2. Економічні показники пневматичних систем залежать від річної продуктивності, видачі та дальності пневмотранспорту золошлакових відходів в межах площадки електростанцій.

Порівняння економічних та екологічних показників «сухих» систем транспортування золи та шлаку на вугільних енергоблоках з традиційними системами гідрозолошлаковидалення показує, що заміна систем гідрозолошлаковидалення (водяних насосів, облад-

нання систем очищення води, золовідвалів та ін.) на системи пневмотранспорту золошлаковидалення сприяє підвищенню ККД котла за рахунок зменшення механічного недопалу при охолодженні шлаку повітрям, зниження теплових втрат на повернення повітря в котел; одержання прибутку від продажу сухого шлаку та золи; зменшення витрат за викиди в навколишнє середовище.

До недоліків слід віднести: вартість, встановлення та пуск нового обладнання:

– за продуктивністю по сухій золі до 200 тис. т/рік і граничної дальності внутрішньостанційного пневмотранспорту до 200 м оптимальною є вакуумна система;

– при продуктивності 300–500 тис. т/рік та пневмотранспорті до 500 м вибір системи пневмозоловидалення для кожної конкретної ТЕС виконується за техніко-економічним розрахунком;

– при дальності вище 500 м та продуктивності більше 500 тис. т/рік оптимальним є сполучення системи збору золи з аерозолобами та транспорту її на склад за високонапірною схемою.

Таким чином, при впровадженні нових систем та технологій електростанція стає багатofункціональним підприємством, яке виробляє електроенергію, тепло і збуває споживачам золошлакові відходи для корисного використання в різних галузях промисловості. Ефективно вирішує проблеми охорони навколишнього середовища зберігаючи природні ресурси, наближає до екологічно чистої ТЕС [8].

1. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. Official Journal of the European Communities, L 309/1, 27.11.2001.

2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). OJ L 334, 17.12.2010, p. 17.

3. Савицький О.В. Огляд теплової енергетики України. Національний екологічний центр

- України, 2014. С. 3. URL: <http://www.pesu.org.ua> (дата звернення 05.03.2017).
4. Здановский В. Глобальные проблемы энергетики. Как нам их решить? Тепловая энергетика Украины должна быть безопасной. *Деньги, экономическая безопасность*. 2013. №21 (118). С. 9.
5. Постанова Верховної Ради України N 188/98-ВР від 05.03.98 «Основні напрямлення державної політики України в галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки».
6. Золошлаки ДТЕК – продукт, а не відхід – СКМ. URL: http://www.sustainability.scm.com.ua/uk/about_scm/.../84/ (дата звернення 03.03.2017).
7. The Use and Disposal of Coal Combustion By-Products at Coal Mines: A Technical Interactive Forum. Morgantown, West Virginia, (2000). p. 290. URL: <https://www.osmre.gov/resources/library/proceedings/2000UseDisposalCCBCoalMinesForum.pdf> (дата звернення 17.04.2017)
8. Агарвал В.К. Технологии удаления летучей золы ТЭС в Индии. *Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование*. Сб. научн. работ 2-й Междунар. науч-практ. семинара. (Москва, 23–24 апр. 2009). Москва. 2009. С. 95—100.
9. Гаврилов Э.И. Топливо-транспортное хозяйство и золошлакоудаление на ТЭС. Москва: Изд-во «Энергоатомиздат», 1987. С.149—154.
10. Урбан Я. Пневматический транспорт. Москва: Изд-во «Машиностроение», 1967. 256 с.
11. Каталог продукции. URL: <http://www.flsmidth.com/ru-ru/> (дата звернення 17.04.2017).
12. Уркелектросервіс: сайт. URL: <http://www.ukrelektroservis.com.ua/> (дата звернення 17.04.2017).
13. Опыт внедрения систем сухого золоудаления ООО «Кварц Групп». URL: <https://www.quartz-group.ru>. (дата звернення 05.08.2017).
14. Клони М., Коломиец Ю. Применение технологии пневмотранспортирования золошлаков от энергоблоков мощностью 300 и 500 МВт угольных электростанций. *Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование*. Сб. научн. работ 2-ой Междунар. науч-практ. семинара. (Москва, 23–24 апр. 2009). Москва. С. 101—103.
15. Типы пневматранспортных систем: особенности. Продукты Clyde Bergemann Group. Презентация 12.2005. URL : <https://www.cbpg.com/ru/produkty-i-resenia/transportirovka-materialov/sistemy-slakaudaleniya/sistemy-suhogo-slakoudaleniya-0>. (дата звернення 06.09.2017).
16. Angela Neville. The Better Environmental Option: Dry Ash Conversion Technology. 2011. URL : <http://www.powermag.com/the-better-environmental-option-dry-ash-conversion-technology/> (дата звернення 10.11.2016).
17. United Conveyor Corporation. URL: <http://unitedconveyor.com/> (дата звернення 12.09.2017).
18. Dry Bjtton Ash Handling Options & New Technology. World Ash Conference 2009 in Lexington. KY, USA. URL: <http://www.flyash.info/2009/Charhut-WOCA2009-plenary.pdf> (дата звернення 12.11.2016).
19. Alan Bullock. Ash handling: Why dry bottoms are better than wet bottoms. Clyde Bergemann, UK, Power Engineering International. 2010. URL: <http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/ash-handling-why-dry-bottoms-are-better-than-wet-bottoms.html> (дата звернення 13.11.2016).
20. Уфимцев В.М., Капустин Ф.Л. и др. Активное расширение использования золошлаков тепловых электростанций. *Энергетик*, 2013. №7. С. 25—28.
21. Радовенчик В.М., Гомеля М.Д. Тверді відходи: збір, переробка, складування. Київ: Вид-во «Кондор». 2010. С.149—153.
22. Компанія Magaldi Power S.p.A. Італія. URL: <http://www.power-technology.com/contractors/materials/magaldigroup/> (дата звернення 15.09.2017).
23. Кузьмин А.Г. Коппола Д., Половинчиков Г.В., Серант М.Д. Экологические решения для российских угольных ТЭС: в Сибири внедряется крупнейшая система шлакоудаления. *Электрические станции*. 2013. №9, С. 38—39.
24. Кесова Л.О., Кравчук Г.В. Проблемы та шляхи утилізації золошлакових відходів ТЕС, *Новини енергетики*. 2013. №4. С. 15—20.

Надійшла до редколегії 20.09.2017.