УДК 620.92

ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ЗОЛИ ВІД КОТЕЛЬНИХ НА БІОМАСІ В УКРАЇНІ

Крамар В.Г., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.9>

Проаналізовано основні фізико-хімічні характеристики золи, що утворюється при спалюванні біомаси, оцінено поточні та перспективні обсяги її утворення в Україні, розглянуто основні можливі напрямки її утилізації, бар'єри розширення її корисного застосування, зокрема, як добрива, та можливі кроки для їх подолання.

Проанализированы основные физико-химические характеристики золы, образующейся при сжигании биомассы, оценены текущие и перспективные объемы ее образования в Украине, рассмотрены основные возможные направления ее утилизации, барьеры расширения ее полезного применения, в частности, как удобрения, и возможные шаги для их преодоления.

The main physicochemical characteristics of biomass ash are analyzed, the current and prospective volumes of its formation in Ukraine are estimated, the main possible directions, the barriers to expanding its useful utilisation, in particular, as a fertilizer, as well as the possible steps to overcome them are considered.

Бібл. 10, табл. 6, рис. 1.

Ключові слова: зола біомаси, зольність, утилізація золи, добрива, відходи..

Актуальність роботи обумовлена зростанням енергетичного використання біомаси, відповідним зростанням обсягів утворення золи після її спалювання та необхідністю її корисної утилізації.

Метою даної роботи є оцінка обсягів утворення золи біомаси в Україні, аналіз можливих напрямків, розробка пропозицій та подальших кроків для подолання існуючих бар'єрів щодо її утилізації.

Методи дослідження включають вивчення статистичних даних, наукових та інших публікацій, проведення оцінок та розрахунків.

Результати дослідження

Кількість і елементний склад утвореної золи, а також інші її властивості залежать від видів біомаси, технологій її спалювання (на решітці або в киплячому шарі; конструкції камери згоряння і котлів; параметрів процесу спалювання (температура горіння, витрата повітря, інші параметри); технологій уловлювання золи з димових газів (циклони, різні фільтри); використання додаткових технологій зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря (введення аміачної води або доломіту у шар спалювання).

Зазвичай розрізняють три фракції золи: зольний

залишок (подова зола); зола виносу з циклонів (циклонна зола); зола виносу з фільтрів (фільтраційна зола). Середній розподіл маси різних фракцій золи та паливні характеристики деяких видів біомаси показано нижче (табл. 1-3).

Зола біомаси містить ряд важливих макро- та мікроелементів, що були увібрані рослинами з ґрунту та залишились в золі після спалювання, зокрема, фосфор та калій, що входять до переліку основних макроелементів, необхідних рослинам, та мають суттєвий вплив на урожайність сільськогосподарських культур.

Нижче (табл. 4) наведено середній вміст основних хімічних елементів в золі різних видів біомаси [5, 6], при цьому бралися до уваги показники загальної золи.

Характерно, що найбільш важливі з екологічної точки зору важкі метали (Zn та Cd) в основному містяться в леткій золі (табл. 5), оскільки ці елементи в процесі спалювання випаровуються та осідають на частках леткої золи у вигляді аерозолів, в той час як поживні елементи (K, Mg та P) та вапняні складові (Ca) в основному потрапляють в подову золу.

Табл. 1. Розподіл фракцій золи для різних котлів та способів спалювання біомаси [1, 2]

Тип котла	Подова зола (%)	Летка зола (%)
спалювання в шарі	60...90	10...40
стокерна подача	40...50	50...60
пилове спалювання	10	90
циркулюючий киплячий шар (CFB)	10...20	80...90

Табл. 2. Розподіл фракцій золи для деяких палив при шаровому спалюванні (%) [3]

Зольна фракція	Кора	Деревна тріска	Тирса
Подова зола	65...85	60...90	20...30
Циклонна зола	10...25	10...30	50...70
Зола тонкої фільтрації	2...10	2...10	10...20

Табл. 3. Середні фізичні характеристики золи деяких видів біомаси (на суху масу) [3, 4]

Вид біомаси	Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	Вміст золи, %	Температура плавлення, °С
Листяна деревина	18,8	тріска з корою: 1,0-2,5; тріска без кори: 0,8...1,4; тирса: 0,5...1,1	1426
Хвойна деревина	18,4		1340
Кора	19,2	5,0...8,0	1440
Солома	17,2	4,0...7,0	998
Лушпиння соняшнику	16,8	3,0...4,0	960
Міскантус	17,6	2,0...5,0	973
Верба енергетична	18,4	1,0...2,5	1283
Виноградна тріска	19,8	2,0...3,0	1450

Табл. 4. Типовий хімічний склад золи після спалювання деяких видів біомаси (% до маси сухої речовини)

Елемент	Тріска хвойних порід	Кора деревини хвойних порід	Солома зернових (пшениця, жито, ячмінь)	Лушпиння соняшнику
Ca	26,0...38,0	24,0...36,0	4,5...8,0	3,7
K	4,9...6,3	5,0...9,9	10,0...16,0	28,8
Mg	2,2...3,6	2,4...5,6	1,1...2,7	1,2
Na	0,3...0,5	0,5...0,7	0,2...1,0	0,8
P	0,8...1,9	1,0...1,9	0,2...6,7	0,3
Si	4,0...11,0	7,0...17,0	16,0...30,0	21,3
C _{org}	0,2...3,1	0,2...1,1	9,0...16,6	н/д

Табл. 5. Приклад розподілу вмісту важких металів у зольних фракціях [7]

Вміст елементів, мг/кг сухої речовини	Cd	Pb	Zn	Cr	Cu	Ni	Hg	As
Подова зола	1	22	500	40	100	45	0.03	3
Летка зола	9	85	1150	70	130	62	0.23	4

Державна статистика не виокремлює обсяги утворення золи від спалювання біомаси. За існуючою практикою, золу біомаси в основному відносять до відходів за групою 90 (Відходи вторинні від надання послуг зі збирання, видалення та оброблення відходів). За Державним класифікатором України «ДК 005-96. Класифікатор відходів», для золи біомаси відповідно до класу застосовують коди: 9010.2.9.01 – Залишок нелеткий та шлак; 9010.2.9.04 – Зола летка. За цими ж кодами обліковуються і інші відходи, що не відносяться до спалювання біомаси.

Значно рідше зустрічаються випадки віднесення золи біомаси до групи 40 (відходи виробництва і розподілу енергії електричної, газу, пари та води гарячої) та присвоєння їй кодів 4010.2.3.04 – Відходи тверді процесу очищення газів топкових інші (зола, вловлена циклонами та фільтрами на виході з котла) та 4010.2.8.01 – Шлак паливний. В основному до групи 40 входять відходи енергетичних станцій на вугіллі та торфї.

Тому, загальну кількість золи, утвореної в Україні від спалювання біомаси (табл. 7) було оцінено на

основі аналізу даних Держстату «Використання та запаси палива у 2019 році», та «Енергетичний баланс України за 2019 рік (продуктовий)», з урахуванням припущень щодо зольності та теплотворної здатності різних видів паливної біомаси.

Враховуючи, що в основному використовується шарове спалювання біомаси, а також те, що циклонами та іншими системами очищення димових газів обладнані лише великі установки, можна прийняти, що в 2019 році потребувало утилізації чи розміщення на звалищах близько 131,8 тис. тон, або 80% всього обсягу золи від спалювання біомаси, включаючи ту, що утворюється в індивідуальному опаленні у населення.

За даними Держстату, в 2019 році, орієнтовна кількість відходів ТЕС та ТЕЦ на викопних паливах (відходи групи 40 за найменуваннями «шлак паливний» та «пил зольний вугільний») становила 5,89 млн тон. Таким чином, на даний час обсяги щорічного утворення золи біомаси становлять близько 2,2% від обсягів утворення золошлакових відходів ТЕС та ТЕЦ. В майбутньому це співвідношення може змінитись внаслідок зміни співвідношень використання біомаси та вугілля в тепловій та електричній генерації.

Якщо враховувати можливі перспективи розвитку біоенергетики в Україні, зокрема, запропоновані в Дорожній карті розвитку біоенергетики до 2050 року [8], споживання твердих біопалив може зрости за період з 2019 до 2035 року в 3,1 разів, і в 4,6 разів до 2050 року. Враховуючи, що основним резервом такого зростання є палива з більшою зольністю, а також можливе зростання частки легкої золи, що уловлюється циклонами та фільтрами, можна очікувати, що в 2035 році в промисловості та енергетиці потребуватиме утилізації до 785 тис. тон, а в 2050 році – до 1 252 тис. тон золи біомаси.

Табл. 6. Оцінка кількості золи від спалювання біомаси в Україні в 2019 році

Сектор	Тверде біопаливо, ТДж	Питомий вихід золи, т/ТДж	Вихід золи, з урахуванням недопалу 10%, т
Перетворення	50658	1,65	83 432
Власне споживання енергосектором	1	1,65	2
Кінцеве споживання, в тому числі:	83839		81 309
Промисловість	3095	1,65	5 097
Побутовий сектор	77807	0,92	71 374
Торгівля та послуги	1781	1,65	2 933
Сільське господарство	1156	1,65	1 904
Всього перетворення + кінцеве споживання			164 742

Відповідно до Закону України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187, кінцевим результатом поводження з відходами можуть бути їх: утилізація – використання відходів як вторинних матеріальних чи енергетичних ресурсів; видалення – здійснення операцій з відходами, що не призводять до їх утилізації; захоронення – остаточне розміщення відходів при їх видаленні у спеціально відведених місцях чи на об'єктах.

Відповідно до Державних санітарних правил та норм, подова зола відноситься до IV класу – «речовини малонебезпечні», а летка зола – до IV або III класу «речовини помірно небезпечні».

На даний час українське законодавство не містить обов'язкових вимог утилізації золи від теплогенеруючих установок, в тому числі золи від спалювання біомаси. Також невідомі приклади практичного застосування золи біомаси в будівельній чи іншій промисловості.

В Україні розроблено ряд державних стандартів, що передбачають використання лише золи від спалювання вугілля на ТЕС [9] як компонента цементних сумішей, бетонів та матеріалів для дорожнього покриття.

Зола, як промислові відходи IV класу небезпеки, може використовуватись на полігоні твердих побутових відходів як ізолюючий матеріал.

На даний час, основним шляхом поводження із золою в Україні є захоронення на полігонах. Цьому сприяє досить невисокий податок за розміщення відходів на полігонах ТПВ (5 грн/тону для відходів IV та 12,84 грн/тону для відходів III класу небезпеки). Якщо з 1 тони паливної біомаси утворюється 50 кг золи, вартість її перевезення, видалення на звалище еквівалентна збільшенню ціни 1 тони палива на 5...6 грн (або на 0,15...1 %).

Також досить розповсюджене незаконне вивезення золи в не передбачені для цього місця. Частково, зола біомаси використовується як добриво – в основному, та, що утворюється у власних пічках чи котлах у населення та використовується на присадибних ділянках. В ряді випадків, місцеве населення безоплатно розбирає золу біомаси з найближчих котельних.

На відміну від України, в ряді країн ЄС зола біомаси знаходить більш широке застосування. Цьому сприяють прийняті в ЄС принципи сталого розвитку. Стале використання біомаси передбачає повернення мінеральних речовин, що міститься в золі біомаси, в їх природний цикл.

Основними сферами застосування золи від спалювання біомаси в ряді країн (рис. 1) є сільське та лісове господарство (використання як добрива) та будівельна промисловість (як домішка для підвищення вмісту магнію, заміник піску).

Також, першочергове значення надається питанням безпеки використання золи для людини та навколишнього середовища. Для використання золи біомаси як добрива, в деяких країнах встановлено вимоги не тільки щодо максимального вмісту важких металів, але й до мінімального вмісту основних поживних речовин, таких як калій, кальцій, магній, фосфор та азот.

Як правило, фільтраційна зола, а також зола від спалювання в киплячому чи циркуляційному киплячому шарі, не може застосовуватись як добриво (остання-через високий вміст баластних речовин та відповідно, низький вміст поживних елементів).

Зола біомаси в Україні традиційно розглядається як місцеве добриво, що має бути використане там, де вона утворилась. Проте, основна її кількість утворюється в промисловості та тепловій енергетиці, і ланцюжок, що має привести її назад в коло природного кругообігу речовин, виявляється розірваним.

Законодавство України на протязі багатьох десятиліть було зорієнтоване на штучні мінеральні добрива. Закон України «Про пестициди та агрохімікати» визначає основні вимоги до сільськогосподарського використання будь-яких препаратів, в тому числі їх обов'язкову державну реєстрацію, крім зазначених у відповідному Переліку, що є додатком до Закону (зола біомаси до цього переліку не входить). Порядок державної реєстрації визначає досить складну та довготривалу процедуру, яка включає розроблення технічних умов, проведення ряду експертиз, а також державних випробувань протягом двох повних вегетаційних періодів. У разі невстановлення або непідтвердження біологічної ефективності нового препарату порівняно з тими, що вже застосовуються, може бути прийняте рішення про його зняття з

Країна	Австрія	Канада	Данія	Німеччина	Італія	Нідерланди	Швеція
Спосіб утилізації							
Полігони, звалища	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)
Добавка в цементне сире борошно	Так (Т)	Так (Т)			Так (Т)		Ні
Заповнювач цементів і бетонів					Можливо (Т)	Так (Т)	
Лісове господарство	Ні		Так (К)			Можливо (Т/З)	Так (К)
Добриво/ покращувач ґрунтів	Так (Т)	Так (К)	Так (К/З)	Так (К)	Так (К)	Так (З)	Ні
Добавка в компост	Так				Можливо	Можливо (Т/З)	
Заповнювач асфальту	Можливо (В)	Ні			Так (Т)	Так (Т)	Ні
Заповнювач шахтних виробок				Так (К)	Ні	Так (К)	Ні
Цивільне будівництво	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)	Так (К)
Інші будівельні матеріали	Так (Т/З)				Можливо (Т/З)	Так (Т/З)	Ні
Інше використання (точно не визначене)		Так (Т/З)					
Експорт (точно не визначений)					Так (К/З)		Так (К/З)
Позначення: Так – застосовується в даній країні; Так (виділено жирним шрифтом та жирною рамкою) – є основним способом застосування; Можливо – можливість застосування вивчається, досліджується; К – кінцеве використання; Т – в залежності від технологічних вимог; З - в залежності від законодавчих вимог							

Рис. 1. Напрямки утилізації золи біомаси в деяких країнах [10]

подальших державних випробувань. Таким чином, на відміну від ряду європейських країн, де зола має законодавчі умови використання в сільському господарстві та лісовій галузі, в Україні вона повинна конкурувати з мінеральними добривами.

На даний час, до «Державного реєстру пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні» внесено лише два препарати на основі золи біомаси: «Екоплант (зола соняшника)» від компанії ТОВ «Орій», та «Екосойл» від компанії ТОВ «Лігнін». Ряд підприємств пропонує як добриво фасовану золу соняшника чи деревини, що не має державної реєстрації для використання в сільському господарстві, а, отже, може використовуватись переважно населенням на присадибних ділянках.

Попри історичний досвід використання золи біомаси як добрива, її агрономічна ефективність в умовах сучасного інтенсивного аграрного виробництва потребує додаткового підтвердження. Звертає на себе увагу дуже мала кількість сучасних вітчизняних експериментальних робіт та польових досліджень ефективності золи біомаси як добрива порівняно з кількістю таких робіт за кордоном. Зокрема, відсутні експериментально обґрунтовані вітчизняні рекомендації щодо масових співвідношень, згідно з якими можна заміщувати золою біомаси традиційні мінеральні добрива.

Бар'єрами для використання золи біомаси в сільському господарстві є ряд її характеристик, зокрема невелика, порівняно із штучними мінеральними добривами, концентрація поживних елементів, відсутність в її складі такого важливого для рослин елемента як азот, суперечливі дані щодо розчинності сполук кальцію та доступності для рослин сполук фосфору, занадто швидке розчинення сполук калію через малий розмір часток золи, висока лужність, зниження ефективності при одночасному застосуванні разом з азотними та фосфорними добривами, великий вміст інертного матеріалу, можливість перевищення дозволеного вмісту важких металів, гігроскопічність та здатність до злежування при тривалому зберіганні, незручності при внесенні в ґрунт через низьку насипну щільність, пилоутворення, «зависання» в бункерах, тощо. Нестабільність хімічного складу та важкість рівномірного розподілу по площі заважає правильному дозуванню, що є однією з основ сучасної практики удобрення, орієнтованої на внесення заданих співвідношень речовин для збалансованого живлення рослин.

Існує ряд технологій та прийомів подолання цих негативних якостей. Деякі з них є давно відомими, наприклад використання водної витяжки золи, внесення золи разом з перегноєм, додавання в компости з торфу або рослинних залишків, контрольоване зволоження та тривале зберігання для зменшення лужності. Інші технології є відносно новими: гранулювання, виробництво органіномінеральних добрив, гуматів, застосування як сировини для виробництва інших видів добрив. Вибір кращих технологій має забезпечувати досягнення оптимальних результатів агротехнічного застосування та прийнятний рівень витрат на виробництво для забезпечення конкурентних переваг порівняно з традиційними мінеральними добривами. Це, в свою чергу потребує теоретичних та практичних напрацювань, польових досліджень нових продуктів, розробку обґрунтованих рекомендацій по їх застосуванню. Також слід враховувати останні тенденції розвитку ринку добрив: орієнтація на висококонцентровані добрива, як односторонні, так і складні, а також на їх суміші, що містять задану кількість та співвідношення діючих речовин в залежності від величини запланованого урожаю, рідкі комплексні добрива, що актуально для посушливих регіонів, розробка нових органіномінеральних та гумінових добрив.

Також слід взяти до уваги зростання популярності в Україні та всьому світі органічного виробництва, що прагне звести до мінімуму використання штучних мінеральних добрив. Внесення золи різних видів біомаси в список речовин, дозволених в органічному виробництві, могло б стати додатковим драйвером її використання.

Доцільність використання золи біомаси визначається залежністю України від імпорту калійних та фосфорних добрив, а також тим, що, за існуючих цін на добрива, сума діючих речовин золи в 3-18 разів дешевша, ніж в традиційних мінеральних добривах. Ринкова ціна на золу біомаси на даний час становить 800-1000 грн/т, використання 1 т золи в переліку на вміст діючих речовин в середньому дозволяє зекономити на традиційних добривах близько 1300 грн, або 56% вартості фосфорно-калійного добрива.

В 2020 році в Україні було використано 302 тис. т фосфорних та калійних добрив. Для теоретичного максимального заміщення цих добрив золою біомаси, відповідно до співвідношень вмісту діючих речовин, знадобилось би близько 1 300 тис.т золи. Це значно перевищує не тільки оцінені поточні обсяги утво-

рення золи (близько 132 тис.т), але й перспективні в 2035 році (близько 785 тис.т). Отже, за обсягом необхідних поживних речовин, аграрний сектор міг би утилізувати всю золу біомаси, що утворюється в промисловості та енергетиці.

Найбільший економічний ефект від заміщення золою біомаси традиційних добрив можна очікувати при її застосуванні для культур, найбільш вимогливих до калійно-фосфорного живлення, з найбільшою інтенсивністю внесення цих добрив на одиницю площі.

ВИСНОВКИ

Для розширення можливостей корисної утилізації золи біомаси, пропонуються такі заходи:

1. Стандартизація золи біомаси як добрива. Визначення критеріїв якості та походження золи для відокремлення тієї, що не може бути використана як добриво.
2. Внесення стандартизованої золи до «Переліку агрохімікатів, дозволених до ввезення на митну територію України, виробництва, торгівлі, застосування та рекламування без їх державної реєстрації».
3. Обґрунтування найбільш раціональних способів утилізації в інших галузях промисловості тієї золи, що не відповідає вимогам її використання в сільському господарстві.
4. Розглянути можливість внесення золи різних видів біомаси до переліку речовин, дозволених до використання в органічному виробництві.
5. Дослідження та розвиток технологій покращення споживчих якостей золи як добрива.
6. Заохочення проведення польових досліджень ефективності золи біомаси як добрива. Розробка різних видів добрив на основі золи біомаси під різні типи ґрунту та різні види сільськогосподарських культур та рекомендацій щодо їх застосування.
7. Підвищення обізнаності серед потенційних груп споживачів про можливості та технології застосування золи біомаси як добрива з підтвердженою ефективністю. Популяризація успішного досвіду агровиробників як України, так і інших країн.
8. Подальша гармонізація норм України з ЄС щодо виробництва добрив та їх застосування. Наприклад, впровадження Національного Регламенту, адаптованого до Регламенту ЄС EU Fertilising Products Regulation ((EU) 2019/1009).

ЛІТЕРАТУРА:

1. J.R. Pels. Overview of options for utilization of biomass ash. BioGeoCivil Summit 2015/ November 2015. ECN-L--15-079 <https://publicaties.ecn.nl/L/2015/ECN-L--15-079>
2. R.J. van Eijk (KEMA), I. Obernberger, K. Supancic (BIOS). IEA Bioenergy Task 32/Deliverable D4. Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing. Arnhem, March 5, 2012.
3. Норберт Вильдбахер. Утилизация золы котельных, работающих на древесном топливе - МИНСК, 2007. - 28 с.
4. Obernberger I. (ed.). Ashes and particulate emissions from biomass combustion-formation, characterization, evaluation, treatment, series "Thermal Biomass Utilization", Volume 3, 1998 ISBN 3-7041-0254-7, dbv-Verlag der Technisches Universitat Graz, Graz, Austria
5. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing* / Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan – Earthscan, 2008. – 465 p.
6. ТУ У 15.4–36813695–002:2010 Гранули паливні з лушпиння соняшнику.
7. *Recycling of biomass ashes in crop production*. Editors: Insam, Heribert, Knapp, Brigitte A. (Eds.) Springer. 2011, VIII, 164 p.
8. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Баитовий А.І. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року// Теплофізика та теплоенергетика, 2020, т.42, №2, с. 60-67. DOI <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.6>
9. Біоенергетична асоціація України. Аналітична записка UABIO № 27 «Обґрунтування напрямків утилізації золи від спалювання біомаси. Зола біомаси як добриво в сільському господарстві.» https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/12/AZ_Kramar_Zastosuvannya-zoly-biomasy-yak-dobryva_fin_ukr2.pdf
10. Frans Lamers (DNVGL), Marcel Cremers (DNVGL), et al. Options for increased use of ash from biomass combustion and co-firing. IEA Bioenergy: Task 32: Biomass Combustion and Cofiring/ Deliverable D7. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/02/IEA-Bioenergy-Ash-management-report-revision-5-november.pdf>

PROBLEMS OF BIOMASS ASH UTILIZATION FROM BOILER HOUSES IN UKRAINE

Kramar V.G., Ph.D.

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova, 2a, Kyiv,
03680, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2021.9>

As result of the study, it was estimated that in 2019 in Ukraine the annual biomass ash formation to be utilized, amounted to 132 thousand tons, and in the future, subject to the goals of bioenergy development, it may increase almost 10 times until 2050. The main way to treat biomass ash in Ukraine is to bury it in landfills, partly use in landfills as an insulating material, and partly as fertilizer, mainly in homesteads. In Ukraine, the widespread use of biomass ash is limited by the lack of legal requirements for its utilization, absence of technical requirements for its use in the construction industry, complex procedure of state registration of pesticides and agrochemicals, which puts biomass ash in unequal competition with the mineral fertilizers. Also, a certain barrier to the use of biomass ash as a fertilizer is its physical and chemical characteristics, which require special methods of its application. The increase in useful utilization of ash requires field research of its effectiveness as a fertilizer, development of different types of fertilizers based on biomass ash for different types of soils and crops and methods of their use with proven efficiency, development of the most efficient utilization methods of the ash, which does not meet the requirements of its use in agriculture, in other industries.

References 10, table 6, figure 1.

Key words: biomass ash, ash content, ash disposal, fertilizers, waste.

1. *J.R. Pels*. Overview of options for utilization of biomass ash. BioGeoCivil Summit 2015/ November 2015. ECN-L--15-079 <https://publicaties.ecn.nl/L/2015/ECN-L--15-079>

2. *R.J. van Eijk* (KEMA), *I. Obernberger*, *K. Supancic* (BIOS). IEA Bioenergy Task 32/Deliverable D4. Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing. Arnhem, March 5, 2012.

3. *Norbert Wildbacher*. [Utilization of ash from wood-fired boiler houses] - MINSK, 2007. - 28 p. (Rus.)

4. *Obernberger I. (ed.)*. Ashes and particulate emissions from biomass combustion-formation, characterization, evaluation, treatment, series "Thermal Biomass Utilization", Volume 3, 1998 ISBN 3-7041-0254-7, dbv-Verlag der Technisches Universitat Graz, Graz, Austria

5. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing* / Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan – Earthscan, 2008. – 465 p.

6. *TU U 15.4 – 36813695 – 002:2010* [Fuel pellets from sunflower husk], Technical Standard (Ukr.).

7. *Recycling of biomass ashes in crop production*. Editors: Insam, Heribert, Knapp, Brigitte A. (Eds.) Springer. 2011, VIII, 164 p.

8. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.* [Roadmap for bioenergy development in Ukraine until 2050], [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2020. Vol. 42. No. 2. P. 60–67. (Ukr.)

DOI <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.6>

9. *Bioenergy Association of Ukraine*. Possible utilization directions of ash from biomass combustion. Biomass ash as fertilizer in agriculture – UABIO Position Paper 27. (Ukr./En.)

https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/12/AZ_Kramar_Zastosuvannya-zoly-biomasy-yak-dobryva_fin_en2.pdf

10. *Frans Lamers* (DNVGL), *Marcel Cremers* (DNVGL) at al. Options for increased use of ash from biomass combustion and co-firing. IEA Bioenergy: Task 32: Biomass Combustion and Cofiring/ Deliverable D7. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/02/IEA-Bioenergy-Ash-management-report-revision-5-november.pdf>

Отримано 06.08.2021

Received 06.08.2021