

УДК 504:661

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-02>

УТИЛІЗАЦІЯ ЗОЛИ РЕШТОК СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИН ШЛЯХОМ ЗАЛУЧЕННЯ ЇЇ У ВИРОБНИЦТВО ДОБРИВ

Ізмоєнова Тетяна Іванівна¹, Гурець Лариса Леонідівна²¹Лабораторія ТОВ «КРОП-ІНКРІС»

1-ий провулок Свободи, буд. 8, м. Ромни, 42000

²Сумський державний університет

вул. Харківська, 116, м. Суми, 40000

*izmodenova.tati@gmail.com**l.gurets@ecolog.sumdu.edu.ua*

Прагнення країнами світу до використання технологій відновлюваних джерел енергії, як засіб реалізації низьковуглецевих рішень, обумовлено кількома глобальними факторами, включаючи зміну клімату, зростання населення та майбутню енергетичну безпеку. До джерел відновлювальної енергетики традиційно відноситься біопаливо з багаторічної деревини та пожнивних решток сільськогосподарських рослин. Біомаса є невичерпним джерелом вуглецю. Спалювання біомаси супроводжується утворенням техногенного відходу - золи. Складування золошлаків без їх утилізації несе наслідки для довкілля: залуження потенційно придатних для сільськогосподарських потреб ґрунтів, забруднення ґрунту та ґрунтових вод токсичними елементами, забруднення повітря дрібними летючими фракціями золошлакових відходів. Використання золи решток сільськогосподарських рослин та зольного добрива в якості меліоранту підвищує родючість ґрунтів через покращення їх фізико-хімічних показників та збільшення рівня забезпеченості ґрунту елементами живлення рослин.

Використання золи решток сільськогосподарських рослин, як відходу, для виробництва комплексних органо-мінеральних добрив з екологічної точки зору є дуже перспективним завданням і дозволяє вирішити різні проблеми техногенного

походження. Зола решток сільськогосподарських рослин складається з широкого спектру елементів, а вміст важких металів в ній як правило не перевищує ГДК, що дає змогу розглядати її як сировину для виробництва органо-мінеральних добрив. Збагачення такої золи фосфором та азотом, і виробництво комплексних добрив, дозволить знизити техногенне навантаження золівдвалів на довкілля, ґрунт та рослини. Авторами досліджувалися: вміст поживних елементів та важких металів у складі золи решток сільськогосподарських рослин, кількість органічного вуглецю, здібність золи до гранулювання та цементування, технології збагачення золи решток сільськогосподарських рослин фосфоровмісною сировиною.

Ключові слова: біопаливо, зола решток сільськогосподарських рослин, техногенне навантаження, утилізація, виробництво органо-мінеральних добрив.

Utilization of ash from agricultural plant residues by using it in the production of fertilizers.
Izmodenova T. I., Hurets L. L.

The global drive to embrace renewable energy as a means of implementing low-carbon solutions is driven by several global factors, including climate change, population growth, and future energy

security. Renewable energy sources traditionally include biofuels made from perennial wood and agricultural residues. Biomass is an inexhaustible source of carbon. Biomass combustion produces ash, a man-made waste. Unrecycled ash accumulation has environmental consequences: it depletes potentially suitable soils for agricultural use, contaminates soil and groundwater with toxic elements, and pollutes the air with fine volatile fractions of ash waste. Using ash from agricultural residues and ash fertilizer as an ameliorant increases soil fertility by improving its physicochemical properties and increasing the availability of plant nutrients.

The appropriate use of agricultural residue ash as a substrate for the production of complex organomineral fertilizers is a very promising approach from an environmental perspective and offers the potential to address various man-made problems. Crop residue ash contains a wide range of elements, and its heavy metal content does not exceed the maximum permissible concentration, making it suitable as a raw material for the production of organomineral fertilizers. Enriching this ash with phosphorus and nitrogen and producing complex fertilizers will reduce the impact of ash disposal sites on the environment, soil, and plants. The authors studied the content of nutrients and heavy metals in agricultural residue ash, the amount of organic carbon, the granulation and cementation properties of the ash, and technologies for enriching agricultural residue ash with phosphorus-containing raw materials.

Key words: biofuels, agricultural residue ash, man-made impacts, recycling, production of organomineral fertilizers.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Інтенсивне використання природних ресурсів в Україні, необхідних для розвитку промисловості та сільського господарства, впродовж багатьох років супроводжувалось зростанням техногенного навантаження на довкілля. Це призвело до виникнення низки екологічних проблем з руйнуванням природних екосистем в багатьох регіонах. Вплив енергетичного сектора на сталі економічне зростання з точки зору довкілля, клімату та безпеки зумовили необхідність продовження програм розвитку відновлюваних джерел енергії та підтримки проектів з енергоефективності, збережен-

ня ресурсів та впровадження більш чистих технологій виробництва [1].

До джерел відновлювальної енергетики традиційно відноситься біопаливо з багаторічної деревини та пожнивних решток сільськогосподарських рослин. Біомаса є невичерпним джерелом вуглецю, оскільки її органічні компоненти походять від тварин і рослин, які надалі можна розділити на первинну біомасу та відходи біомаси. Зокрема, відходи біомаси включають відходи лісового господарства та сільського господарства (наприклад, деревину, листя, стовбури, листя, шкірку, лушпиння та горіхи). Завдяки своїй відновлюваності відходи біомаси є багатообіцяючим заміником викопного палива для відновлення енергії. За останні роки було проведено значну кількість досліджень з вивчення та оптимізації потенціалу відходів біомаси, як сировини для рекуперації та виробництва енергії [2]. Сільськогосподарське виробництво є потужним джерелом утворення відходів. До перших належать відходи, що залишаються після збору врожаю сільськогосподарських культур: солома злакових культур, стебла соняшнику і кукурудзи, бадилля овочевих культур тощо. До других – залишки переробної промисловості: лушпиння, полова, шкірка та інші. Близько 20-40% соломи можна щорічно використовувати для подальшої переробки, а саме, використання в якості сировини для виробництва біопалива [3, 4, 5].

Спалювання біомаси супроводжується утворенням техногенного відходу – золи. В зв'язку з тим, що для теплогенеруючих установок підприємства все більше переходять на біопаливо, то виникає проблема її утилізації. В основному зола вивозиться на полігони твердих побутових відходів, що спричиняє додаткові витрати підприємств та збільшує антропогенне навантаження на екосистему [6]. 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 секторі опалення у населення. На даний час українське законодавство не містить обов'язкових вимог утилізації золи від теплогенеруючих установок, в тому числі золи решток сільськогосподарських рослин [7, 8, 9]. За даними Державної служби статистики України істотно збільшилося використання біопалива з пожнивних решток сільськогосподарських рослин. По мірі зміни співвідношень

використання біомаси рослинних решток та вугілля, змінюватиметься і співвідношення утворення її золи та вугілля. Якщо враховувати перспективи розвитку біоенергетики в Україні до 2035 року, споживання твердого біопалива має зрости в 3,5 разів, а кількість утвореної рослинної золи може зрости в 5-8 разів, і в 2035 році в промисловості та енергетиці утвориться і потребуватиме утилізації до 550 тис. тон цієї золи [7, 10].

В продовж останніх років, для зберігання й сушіння великих об'ємів зерна, в аграрних і зернопереробних господарствах України активно проведено модернізацію та інвестування в будівництво елеваторів для зберігання і досушування зерна [11]. До 2020 року зернові сушарні в господарствах комплектували переважно газовими котлами. По мірі зростання ціни на газ, а потім і зменшення цін на продукцію рослинництва, а потім і через війну в країні, активними темпами розпочалися та тривають роботи з реконструкції сушарок. Для генерації тепла встановлюються котли на твердому паливі. Згідно з даними, одержаними компанією ТОВ «Кроп-Інкріс», в 2020 році до 65,4 % клієнтів компанії сушили продукцію рослинництва з використанням газу для генерації тепла, 23,6 % клієнтів комбінували газ і тверде паливо (деревина і солома), до 5,4 % – тільки тверде і мазут. Після 2023 року ситуація кардинально змінилася. Сьогодні для сушіння зерна використовують тільки газ 34,1 % клієнтів, комбінують газ з твердим паливом 30,7 %, деревину і соломку 29,5 %, мазут 5,7 % (Результати аналітичних досліджень компанії ТОВ «Кроп-Інкріс» з цього питання були використані при підготовці кваліфікаційної роботи бакалавра в Сумському державному університеті [12]). Отже, кількість господарств, які використовують деревину й соломку для генерації тепла при сушінні зерна зросла з 29,0 % до 60,2 %. Це призводить до збільшення об'ємів золоматеріалів [10].

Золовідвали, на яких накопичується і зберігається зола, незважаючи на огорожену територію, є відкритими системами. В зонах впливу золовідвалів формуються несприятливі екологічні ситуації: відчуження територій (орної землі), запилення з поверхні золовідвалів, забруднення атмосферного повітря (випаровування луку, тощо), осідання пилу на поверхню, міграція забруднюючих речовин крізь профіль ґрунту (ґрунтові та підземні води), вплив на організм людини [13]. Поряд з

мінеральними мікро- і макрокомпонентами, золошлакові відходи містять органічні речовини, що пов'язані з «недопалом» вуглецю. При порушенні режиму спалювання палива (а це часто трапляється на практиці) його вміст може значно збільшуватись. І через це не можна обійти увагою ймовірну пожежну небезпеку на золовідвалах. Шкідливі речовини, які входять до складу золошлаків, можуть мігрувати з поверхні золовідвалу через повітряне середовище, шляхом пилоутворення внаслідок високої дисперсності золошлакового пилу, та забруднювати приземний шар атмосфери, ґрунт, підземні і поверхневі води районів, що розташовані на відстані до декількох кілометрів від накопичувача золовідходів. Також вимивання рухливих компонентів золи та попадання їх у воду, збільшує мінералізацію ґрунтових вод та негативно впливає на навколишнє середовище [14]. Накопичення забруднюючих речовин в ґрунтово-рослинному покриві на золовідвалах зумовлює їх можливе засвоєння ґрунтами і рослинами. При цьому, існує загроза їх міграції у горизонтальному і вертикальному напрямках. Поширюючись в подальшому за різними трофічними ланцюгами, токсичні речовини, що містяться в золошлакових відходах, можуть викликати деградацію біосистеми та негативно впливати на здоров'я людини [15]. Складування золошлаків без їх утилізації несе такі наслідки для довкілля: залуження потенційно придатних для сільськогосподарських потреб ґрунтів, забруднення ґрунту та ґрунтових вод токсичними елементами, забруднення повітря дрібними летючими фракціями золошлакових відходів.

Сьогодні накопичення золи решток сільськогосподарських рослин в підприємствах переробної промисловості та в аграрних господарствах збільшилося. Утилізація цієї золи проводиться переважно вивозом її на поля, в якості добрива. В цьому звичайно є раціональне зерно, так як вона має підвищений вміст фосфору, калію і сірки. Також через високий вміст в ній лужних структурують елементів, таких як кальцій і магній, внесення золи в ґрунт є ефективним заходом для відтворення її родючості, особливо для нейтралізації кислих ґрунтів. Закордонний досвід використання рослинної золи свідчить про різні напрямки її застосування (сільське господарство, будівельна та металургійна промисловість). Відомим напрямком утилізації відходів у світовій та укра-

їнській практиці є будівельна галузь – отримання сировини для будівельних матеріалів (цементів, заповнювачів) та будівництво доріг різного призначення. В країнах ЄС важливого значення надають питанню сталого використання біомаси, що передбачає повернення мінеральних речовин, що містяться в золі, в їх природний цикл. З іншого боку, першочергове значення надається питанням безпеки використання золи біомаси для людини та навколишнього середовища, тому встановлюються відповідні обмеження, зокрема, щодо вмісту важких металів. При цьому спосіб утилізації такої золи має бути економічно вигідний або найменш витратний [7, 16 - 19].

Властивості золи решток сільськогосподарських рослин, її кількісний та елементний склад залежать від основних факторів: видів спалюваних решток сільськогосподарських рослин (види, частини спалюваних рослин, форми і технології зберігання біомаси для спалювання); їх походження (грунтово-кліматичні умови вирощування рослин, внесення добрив); умов підготовки для спалювання і зберігання; технології спалювання (спалювання на решітці або в киплячому шарі, конструкції камери згоряння і котлів, параметри процесу спалювання, температура горіння, витрата повітря та інші параметри); технології уловлювання золи з димових газів (циклони, різні фільтри); використання додаткових технологій щодо запобігання наднормативних викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, що використовуються при спалюванні решток сільськогосподарських рослин [7, 20-22].

За даними різних досліджень, які проводилися в Україні і світі, рослинна зола належить до відходів з лужними властивостями. Сольовий рН в 1% розчині KCl варіює 12,7-13,2, водний рН 9,5-11,3. Основні золоутворюючі елементи в біомасі включають Ca, Si, Al, Ti, Fe, Mg, Na, K, S та P. При цьому, вміст основних хімічних елементів в золі різних видів сільськогосподарських рослин може варіювати в широких діапазонах значень. Так, питома вага Ca може змінюватися від 3,7 до 38 %, Si від 4,0 до 30,0 %, Mg від 1,1 до 5,6 %, K від 4,9 до 28,8 %, P від 0,3 до 6,7%. Середня щільність частинок і насипна щільність золи решток сільськогосподарських рослин залежить від фракції та варіює відповідно від 2300 до 3000 та від 230 до 1050 кг/м³. Щільність частинок зменшується від подової золи до фільтраційної. Загалом, розмі-

ри частинок залежать від виду біопалива, вмісту та хімічного складу біомаси, обсягу мінеральних домішок в паливі [7]. Розміри частинок подової золи залежать від її спікання, а розміри частинок золи виносу залежать від використаної технології поділу золи виносу і хімічного складу біопалива [13, 16, 23].

Однією з основних фізичних характеристик золи є температура плавлення. Саме вона впливає на остаточний склад та агрегатний стан золи після спалювання біомаси. Також склад золи залежить від технології спалювання рослинних решток. При спалюванні їх при високих температурах відбуваються процеси забруднення реакторів газифікації. Ці проблеми можуть включати застосування видалення золи, спричинене її шлаком, спікання, осадження, ерозія, корозія та викиди забруднюючих речовин, які в основному створюються наявністю у золі решток сільськогосподарських рослин лужних металів, лужноземельних металів, кремнію, хлору та сірки [3].

Загальний масовий вихід золи при спалюванні рослинних решток залежить від її зольності, вона може становити 5-10 % у листях рослин і до 30-40% у лушпинні [7, 24]. Наявність важких металів у рухомій формі, що містяться в зольних залишках, також може мати негативні наслідки на навколишнє середовище при нераціональному управлінні та утилізації через можливе вимивання в підземні та поверхневі води. Відомо, що вміст важких металів в золі різноманітних рослин може варіювати в широких діапазонах, наприклад, виявляли As в кількості від 0,0 до 10 мг/кг, Cd від 0,0 до 5 мг/кг, Pb від 0,0 до 100 мг/кг, Cr від 0,0 до 50 мг/кг [25]. Наприклад, зола деревини зазвичай має вищу концентрацію As, Cd, Pb і Hg, ніж зола соломи пшениці, ріпака, кукурудзи та інших сільськогосподарських культур. При цьому, як правило, вміст цих важких металів в золі решток сільськогосподарських рослин не перевищує ГДК.

Деякі мінеральні поживні речовини золи решток сільськогосподарських рослин можуть надавати оздоровчий ефект при її застосуванні на кислих ґрунтах. Olanders та інші [26], у своїй роботі повідомили, що зола решток сільськогосподарських рослин містить лише незначну кількість важких металів, що робить її досить вигідною для утилізації шляхом виробництва добрив. Використання золи решток сільськогоспо-

дарських рослин в якості меліоранту та зольного добрива підвищує родючість ґрунтів через покращення їх фізико-хімічних показників (збільшення показників ємності катіонного обміну, кількості органічної речовини, нейтралізації кислотності, оструктуреності та інші) та збільшення рівня забезпеченості ґрунту елементами живлення рослин. Це знижує деградацію ґрунтів, хімічне забруднення та накопичення забруднюючих речовин в ґрунтово-рослинному покриві. Через високий вміст калію та інших елементів в біомасі сільськогосподарських рослин, їх зола – є альтернативною сировиною для виробництва добрив. При цьому, використання золи решток сільськогосподарських рослин у виробництві простих добрив знижує техногенне навантаження на довкілля (від видобутку сировини до технології виробництва) та сприяє ефективному її застосуванню в сільському господарстві.

В Україні працює низка підприємств з реалізації фасованої золи, як меліоранту для кислих ґрунтів. Також є підприємства (ТОВ «ОРІЙ» та ТОВ «Алмаз-М»), які використовують золу лушпиння соняшника для виробництва калійного добрива. На цих підприємствах виробляються прості гранульовані зольні добрива з високим вмістом калію. При цьому, рівень фосфору (в перерахунку на P_2O_5) в них незначний і не перевищує 8 % [27]. В технології виробництва простих зольних добрив застосовується метод окатування на тарілчастому грануляторі при зволоженні золи від 40 до 60%, з наступним сушінням гранул в печах при температурі 60-70 °С, їх калібруванням та фасуванням. Це єдиний метод технологічного виробництва простих зольних добрив. Він затратний і має низку недоліків. Для гранулювання золи лушпиння соняшника використовується велика кількість води, а отримані гранули володіють високим показником вологості і потребують тривалого часу для їх сушіння, що призводить до підвищення енергоємності виробництва. В процесі окатування отримуються гранули різного розміру, що потребує додаткового їх калібрування [28].

Через непропорційне зростання ціни на основні добрива, переважно фосфорного компоненту, відносно продукції рослинництва впродовж тривалого часу кількість внесених добрив в Україні скоротилася. З приводу чого з року в рік триває зменшення вмісту доступного фосфору в ґрун-

ті [27]. Через воєнні дії в Україні сталися значні зміни на ринку фосфорних і калійних добрив (змінився їх асортимент та значно зросла ціна). Основним джерелом фосфору для виробництва складних добрив є фосфоритне борошно, експортоване з Близького сходу, північної Африки та Казахстану [27]. Існуючі на ринку України добрива на основі золи лушпиння соняшника мають вкрай обмежені можливості застосування, через відсутність в цих добривах азоту та доступного фосфору. В зв'язку з цим, актуальним є пошук альтернативних джерел калію й фосфору та створення збалансованих, впершу чергу за фосфором і калієм, водорозчинних комплексних органо-мінеральних добрив [27].

Збагачення золи решток сільськогосподарських рослин фосфором і азотом, дає можливість отримувати комплексні органо-мінеральні азотно-фосфорно-калійні добрива та одночасно знизити техногенне навантаження золівідвалів на довкілля, ґрунт та рослини [25]. Також повторне використання золи решток сільськогосподарських рослин у сільському господарстві може сприяти реалізації замкнених циклів поживних речовин, обмежити кількість застосування тільки мінеральних добрив, що дасть можливість зменшити техногенне навантаження на ґрунти. Утилізація золи решток сільськогосподарських рослин, шляхом виробництва органо-мінеральних добрив, дозволить вирішити екологічну проблему, а також зменшити витрати на зберігання, звільняючи зайняті землі під господарські потреби, які з кожним роком потребують дедалі більше територій, що негативно впливає на навколишнє середовище.

Викладання основного матеріалу

При проведенні нами експериментальних досліджень золи решток різних сільськогосподарських рослин з теплогенеруючих установок встановлено, що за вмістом калію найбільш придатною для виробництва добрив була зола з лушпиння і соломи соняшнику. Так, питома вага зразків цієї золи за вмістом калію (в перерахунку на K_2O) більше 20% становила відповідно 95,6 та 28,6%. Кількість зразків з високим вмістом калію в золі соломи озимої пшениці, ріпака, кукурудзи та деревени не перевищувала 23,8% [27]. Отже, в якості джерела калію зола лушпиння соняшника має першочергове зна-

чення [20]. Дослідження зразків золи решток сільськогосподарських рослин на вміст фосфору, високий його вміст частіше виявляли в золі лушпиння соняшника, кукурудзи і озимої пшениці. Так, питома вага зразків золи цих культур, за вмістом фосфору, в перерахунку на P_2O_5 більше 6%, становила відповідно 73,9, 38,1 і 36,8%. Кількість зразків золи інших культур (соломи озимого ріпаку і соняшника) з високим вмістом фосфору не перевищувала 28,6%. За допомогою методу рентгенівської енергодисперсійної спектроскопії виявлено, що в склад золи решток сільськогосподарських рослин також входять агрохімічно цінні хімічні елементи такі як, Ca – 3,61-27,13%, Mg – 1,52-3,04%, S – 0,65-4,49% та інші елементи (Cu, Zn, Mn, Fe), вміст яких не перевищував 1% [13]. Екологічну безпечність цієї золи встановлювали за допомогою аналізів на наявність важких металів (Pb, Cd, As) в ній. Результати аналізів з промислових котелень показали, що вміст важких металів не перевищував ГДК.

Нами встановлено, що зола решток сільськогосподарських рослин належить до органо-мінеральної сировини, яка через присутність в ній недопалених органічних речовин з сорбційними властивостями може відігравати знану роль в обмеженні засвоюваності важких металів та покращенні поглинання обмежено рухомого фосфору з ґрунту рослинами [6]. Кількість органічного вуглецю в золі решток сільськогосподарських рослин була не високою та знаходилася в межах від 0,15 до 2,98%. Найбільше органічного вуглецю виявляли в золі соломи кукурудзи від 1,56 до 2,98, озимої пшениці – від 0,55 до 2,58, соняшнику – від 1,67 до 2,45, озимого ріпаку – від 1,53 до 2,15%. Кількість органічного вуглецю в золі лушпиння соняшника була значно менша та знаходилася в межах від 0,15 до 0,55%. Основним технологічним показником у виробництві гранульованих добрив є здатність сировини до цементування (утворення гранул з певними показниками міцності). Проведені нами дослідження виявили, що зола решток сільськогосподарських рослин гранулюється та має здатність до цементування. Саме цю особливість використовують при виробництві простих добрив із золи лушпиння соняшника. При проведенні нами лабораторних досліджень встановлено, що якість гранулювання і цементування золи решток сільськогосподарських рослин менше залежить від виду спаленої рослинної біомаси, а

більше від вмісту кальциту та кількості вільних карбонатів в ній. При гранулюванні зразків золи соломи озимої пшениці, кукурудзи, соняшника, озимого ріпаку та сої з різним вмістом цих компонентів виявлено, що найбільшою міцністю (1,45-3,10 МПа) володіли зольні гранули діаметром 4 мм при кількості CaO в межах 10,76-29,77% та CO_3^{2-} в межах 11,35-23,21%. У випадку зменшення вмісту кальцію (<10% як CaO) або вільних карбонатів (<10% CO_3^{2-}), статична міцність значно зменшувалася та не перевищувала 1 МПа [13]. Методом множинної кореляції нами був проведений аналіз, який підтвердив висновки, щодо впливу окремих компонентів в золі решток сільськогосподарських рослин на її здібності щодо цементування. Так, коефіцієнт множинної кореляції між статичною міцністю зольних гранул та вмістом кальцію і вільних карбонатів, в порівнянні з іншими складовими, був найбільшим $r_{x(yz)} = 0,901$. Вплив інших компонентів в золі решток сільськогосподарських рослин на твердіння встановлено не було [13].

З метою підвищення агрохімічних цінностей зольних добрив є доцільним збагачувати золу решток всіх сільськогосподарських рослин на фосфор та азот. Але, через невисокий рівень контамінації літосферним компонентом та майже відсутністю вилуговування у лушпиння соняшника, його зола володіє високими показниками на вміст калію і фосфору, та, як було доведено дослідженнями в лабораторії ТОВ «Кроп-Інкріс» і частково представлено в бакалаврській роботі університету, є більш придатною для виробництва модифікованих зольних NPK-добрив [13]. Результати проведених досліджень свідчать про те, що саме золу лушпиння соняшника можна розглядати, як екологічно-чисту калійну сировину для виробництва добрив, яка може гранулюватися та цементуватися і володіє сорбційними властивостями. Тому в усіх експериментальних дослідженнях по збагаченню фосфоровмісною сировиною нами була використана саме зола лушпиння соняшника.

Для отримання комплексних органо-мінеральних добрив, нами були проведені експериментальні дослідження по збагаченню золи лушпиння соняшника носієм загального і водорозчинного фосфору, у вигляді фосфоритного борошна, ортофосфорної кислоти та моноамонійфосфату (МАФ). При збагаченні золи лушпиння соняшника фосфоритним борошном, вдалось отримати органо-мі-

неральні добрива з підвищеним вмістом фосфору. Проте, фосфор був цитраторозчинним і важкодоступним для рослин. Також при його використанні існують ризики забруднення добрив важкими металами, які присутні в фосфоритному борошні. При використанні ортофосфорної кислоти вдалось збагатити золу лушпиння соняшника на фосфор (водорозчинний та цитратний). Отримані модифікації зольних добрив мають перспективу для виробництва і подальшого вивчення. Але, при використанні агресивної ортофосфорної кислоти для збагачення золи лушпиння соняшника, з наступним гранулюванням і сушінням добрив, робить процес виробництва небезпечним, який тягне за собою шкідливі наслідки для навколишнього середовища та вимагає впровадження певних еколого-технологічних рішень в процесі виробництва.

Перспективним, з огляду отримання високоякісного органо-мінерального добрива та екологічної безпеки для навколишнього середовища, є збагачення золи лушпиння соняшника моноамонійфосфатом. Використання МАФ для збагачення золи лушпиння соняшника, дозволило отримувати модифіковані зольні NPK-добрива не тільки з цитрато- та водорозчинним фосфором, але й з азотом. Процес грануляції при поєднанні золи лушпиння соняшника з МАФ відбувався в 1,5-2 рази швидше, ніж тільки золи та її сумішей з ортофосфорною кислотою. Також вдавалось провести якісне гранулювання з отриманням гранул більше 1 мм не менше 98,5%. При цьому, цінні фракції модифікованих зольних NPK-добрив розміром від 2 до 4 мм склали до 75% від маси. Статична міцність гранульованої золи лушпиння соняшника становила 2,86 МПа, а сумішей її з МАФ від 2,35 до 2,56 МПа [27]. Відпрацьована технологія отримання органо-мінеральних добрив методом окатування на тарілчастом грануляторі відповідає всім характеристикам, необхідним для безпечного та енергоощадного виробництва.

Головні висновки

Спалювання біомаси супроводжується утворенням техногенного відходу - золи. В зв'язку з цим, виникає проблема її утилізації. Збільшення використання біопалива з поживних решток призведе до збільшення об'ємів золи, що обумовлює раціональну її утилізацію. Зола решток

сільськогосподарських рослин складається з широкого спектру елементів, а вміст важких металів в ній не перевищує ГДК, що дає змогу розглядати її як сировину для виробництва органо-мінеральних добрив. Збагачення такої золи фосфором та азотом, і виробництво комплексних органо-мінеральних добрив, дозволить знизити техногенне навантаження золівідвалів на довкілля, ґрунт та рослини. Виявлена можливість збагачення рослинної золи носієм загального і водорозчинного фосфору, у вигляді фосфоритного борошна, ортофосфорної кислоти та моноамонійфосфату. Дана оцінка екологічності отриманих добрив та безпеки для навколишнього середовища в процесі виробництва.

Список використаної літератури

1. Економіка довкілля і природних ресурсів: монографія. / Дзядикевич Ю. В. та інші. Тернопіль: Астон, 2016. 392 с.
2. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: progress, challenges, and future directions. / Foong S. Y., et al. *Chemical Engineering Journal*. 2020. 389. P. 124401.
3. Vamvuka, D. Comparative fixed fluidized bed experiments for the thermal behaviour and environmental impact of olive kernel ash renew. *Energy*. 2009. 34. P. 158–164.
4. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Жовмір М. М., Матвєєв Ю. Б., Дроздова О. І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 32. № 6. С. 58-65.
5. Кухарець С. М. Голуб Г. А. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива. *Вісник Житомир. нац. агроєколог. ун-ту*. 2012. № 1. Т. 1. С. 345-352.
6. Vakall V., Izmodenova T., Vakal S., Shepeta K., Malovanyu M. Obtaining and studying promising types of natural sorbents for modifying mineral fertilizers. *Chemistry & Chemical Technology, Poland*, 2024, Vol. 18, No. 4, P. 652–662.
7. Крамар В.Г. Обґрунтування напрямів утилізації золи від спалювання біомаси. Зола біомаси як добриво в сільському господарстві. Аналітична записка UABIO 2020, № 27, с. 75.
8. Крамар В. Г. Проблеми утилізації золи від котельних на біомасі в Україні. *Теплофізика та*

теплоенергетика. 2021. Т. 43, № 3. С. 71-77.

9. The Study of Ecological State of Waste Disposal Areas of Energy and Mining Companies / A. Gorova, A. Pavlychenko, O. Borysovska. Mining of Mineral Deposits. Leiden, The Netherlands: CRC Press. Balkema, 2013. P.169-171.

10. Вакал С. В., Шепета К. О., Вакал В. С., Измоденова Т. І. Формування хімічної структури золи з соломи озимої пшениці в залежності від родючості ґрунту та внесених добрив. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. Київ. 2014. № 6, 2024. С. 60-74.

11. Ельке Лакемеєр. Виробництво біоенергії в Україні: за матеріалами консультативної роботи Інституту економічних досліджень та політичних консультацій. Пропозиція. 2007. № 11. С. 30.

12. Птащенко Р. Ю. КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА на здобуття освітнього ступеня бакалавр. Технології використання відходів рослинництва в якості енергетичних ресурсів. Сумський державний університет, Суми – 2024, с. 40.

13. Измоденова Т. І., Гурець Л. Л. Зола решток сільськогосподарських рослин, як сировина для виробництва органо-мінеральних добрив. XII Міжнародна науково-практична конференція «Modern problems of ensuring the quality of life in the world: present and future». (March 24-26, 2025), Lyon, France. 2025. P. 188-191.

14. Березняк О. О., Борисовська О. О. Оцінка питомого пиловиносу із золосховища Придніпровської ТЕС. «Наукова весна 2024»: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2023. – С. 85-86.

15. Ходаківська О. В., Корчинська С. Г., Матвієнко А. П. Економічні проблеми відтворення родючості ґрунтів. Вісник аграрної науки. 2017. № 12. С. 71-75.

16. Колесник В. Є., Борисовська О. О., Монюк І. В. Аналіз визначальних чинників екологічної небезпеки та заходів по її зниженню в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля». Збірник наукових праць НГУ. 2023. №73. С. 218-228.

17. Петряєв М. В., Полякова Ю. П., Топоров А. А., Трет'яков П. В. Порівняльно-оглядова характеристика екструдерних та грануляційних установок. Наукові праці ДонНТУ. 2019. № 1(16). С. 36-44.

18. Lèbre, É., Corder, G.D., Golev, A. Sustainable

practices in the management of mining waste: a focus on the mineral resource. Minerals Engineering. 2017. Vol 107. P. 34-42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004> (дата звернення: 20.04.2023).

19. Perkov Ye., Perkova T. Recycling of Prydniprovskya thermal power plant fly ash. Mining of Mineral Deposits, 2017. 11(1), P. 106-112.

20. Hurets L., Izmodenova T., Vakal V., Vakal S., Malovanyu M. Utilization of Renewable Energy Waste (Wood Ash and Straw) in the Production of Mineral Fertilizers. Journal of Ecological Engineering Poland, 2024. 25 (4). P. 332–339.

21. Измоденова Т. І., Вакал В. С., Гурець Л. Л., Вакал С. В. Утилізація золи від спалювання біопалива з поживних решток. XIV International Scientific and Practical Conference «World trends, realities and accompanying problems of development» Copenhagen, Denmark. International Science Group. 2023. P. 19-22.

22. Звіт про дослідження якості соломи як твердого біопалива. Завдання 2. Київ.: 2014. 13 с. URL: <https://myrgorod.pl.ua/files/images/Madem/7.pdf> (дата звернення: 10.07.2023).

23. Stankowski S., Chajduk E., Osńska B., Gibczyńska M. Biomass ash as a potential raw material for the production of mineral fertilisers. Agronomy Research. 2021. No 19(4). P. 1999–2012.

24. Ковальський В. П., Тимошенко В. О. Дослідження перспективи використання золи виносу в будівництві. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2023. С. 36-42.

25. Вакал С. В. Науково-теоретичні основи створення нових екологічно безпечних технологічних процесів виробництв фосфоровмісних добрив: дис. д-ра техн. наук: 21.06.01 / Сумський держ. ун-т. Суми, 2018. 422 с.

26. Olanders, B., Steenari, B. Characterization of ashes from wood and straw. Biomass Bioenergy. 1994. No 8. P. 105–115.

27. Гурець Л.Л., Измоденова Т. І., Вакал В. С., Вакал С. В., Клименко О. Г. Застосування золи від спалювання сільськогосподарських залишків у виробництві добрив. Збірник наукових праць національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. Наукове видання №1, 2024, Гельветика, Миколаїв, С. 139-150.

28. Колісниченко О. М. Спосіб отримання мінерального добрива: кор. модель UA50392. № u200911926; заявл. 20.11.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.