

APPLICATION OF ASH FROM AGRICULTURAL CROP RESIDUES
COMBUSTION IN FERTILIZER PRODUCTIONЗАСТОСУВАННЯ ЗОЛИ ВІД СПАЛЮВАННЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗАЛИШКІВ У ВИРОБНИЦТВІ ДОБРИВ**Larysa L. Hurets**

larisagurets@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2318-4223

Tetiana I. Izmodenova

izmodenova.tati@gmail.com

ORCID: 0009-0006-7896-1591

Viktoriia S. Vakal

vsvakal@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2208-7162

Serhii V. Vakal

svvakal@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3547-4930

Oleh H. Klymenko

klymenko.o@increase.com.ua

ORCID: 0009-0002-6615-518X

Л. Л. Гурець,

д-р техн. наук, професор

Т. І. Ізмоєнова,

пошукувач

В. С. Вакал,

канд. техн. наук

С. В. Вакал,

д-р техн. наук, старший науковий співробітник

О. Г. Клименко*Research Institute of Mineral Fertilizers and Pigments of Sumy State University, Sumy**Науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів Сумського державного університету, м. Суми*

Abstract. Purpose. Reduction of technogenic load on the environment by applying ash from combustion of crop residues as an independent potassium-containing fertilizer and a component of complex fertilizers.

Method. Analytical determination of physico-chemical parameters of ash, phosphate raw materials (phosphorite and monoammonium phosphate) and received fertilizer samples was performed in laboratory conditions for conformity with regulatory documentation. Experimental laboratory research was carried out on the development of formulations of phosphorus-potassium and nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers. Technologies for their production by casting and molding methods have been processed. **Results.** The conducted studies proved the possibility of using secondary products of crop production – accumulated ash in the production of fertilizers. At the first stage, research was carried out on granulation using the method of rolling ash from sunflower husks and its mixture with phosphorite in various ratios. Based on the results of the experiment, the theoretically calculated and actually obtained parameters of the fertilizer brand were compared. The use of MAPh for ash enrichment allowed to obtain granular complex fertilizers with water-soluble phosphorus and nitrogen. A more controlled nitrogen content in fertilizers was obtained by mixing ash and MAPh in equal or similar proportions. **Scientific novelty.** The possibility of obtaining an agrochemically balanced phosphorus-potassium fertilizer based on ash from combustion the agricultural crops residues with a low phosphorus content and a high potassium content is shown. At the same time, the use of rolling technology on a plate granulator allows for the controlled production of compositions of phosphorus-potassium ash-phosphorite fertilizers with a wide range of nutrients. The production technology of universal complex nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers with water-soluble nitrogen and phosphorus based on ash was developed. Technologies of granulation on plate and roller granulators were performed with the production of complex NPK fertilizers. **Practical importance.** Experimental and industrial tests were conducted on the production of a granulated product by the method of rolling on a plate granulator and on forming on a roller granulator. Two experimental and industrial batches of NPK fertilizers in the amount of 30 tons were produced. Two research and industrial batches of NPK fertilizers in the amount of 30 tons have been produced. Analytical studies of the obtained complex nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers were performed. The rolling method allows you to obtain a granular product with a water-soluble phosphorus content of more than 50% and greater nitrogen losses. The product obtained by the forming method has a water-soluble phosphorus content of no more than 50% and lower nitrogen losses. Based on their physical and chemical properties, the obtained fertilizers can be used as basic and starter fertilizers.

Key words: biomass; ash; phosphorite; ammophos; complex fertilizer.

Анотація. *Мета.* Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище шляхом застосування золи від спалювання решток сільськогосподарських культур як самостійного калієвмісного добрива та компонента складних добрив. *Методика.* В лабораторних умовах виконано аналітичне визначення фізико-хімічних показників золи, фосфатної сировини (фосфориту і моноамонійфосфату) та отриманих зразків добрив на відповідність нормативної документації. Проведено експериментальні лабораторні дослідження з розробки рецептур фосфорно-калійних та азотно-фосфорно-калійних добрив. Опрацьовано технології їх одержання методом окатування та формоутворення. *Результати.* Проведені дослідження довели можливість використання вторинної продукції рослинництва – накопиченої золи, у виробництві добрив. На першому етапі проводили дослідження з гранулювання методом окатування золи з лушпиння соняшнику та її суміші з фосфоритом у різних співвідношеннях. За результатами проведеного експерименту порівнювалися теоретично розраховані та фактично одержані параметри марки добрива. Використання для збагачення золи МАФ дозволило отримувати гранульовані комплексні добрива не тільки з водорозчинним фосфором, але й азотом. Більш контрольований вміст азоту в добривах вдавалося отримувати при змішуванні золи й МАФ у рівних або близьких пропорціях. *Наукова новизна.* Показана можливість на основі золи від спалювання решток сільськогосподарських культур з невисоким вмістом фосфору та високого вмісту калію одержувати агрохімічно збалансоване за фосфором фосфорно-калійне добриво. При цьому використання технології обкатування на тарілчастому грануляторі дозволяє контролювати виробляти композиції фосфорно-калійних зольно-фосфоритних добрив з широким діапазоном вмісту елементів живлення. Для отримання універсальних комплексних азотно-фосфорно-калійних добрив із водорозчинними азотом і фосфором на основі золи відпрацьовано технології виробництва добрив за технологіями обкатування на тарілчастому і валковому грануляторі з одержанням складних добрив марки NPK. *Практична значимість.* Проведено дослідно-промислові випробування з одержання гранульованого продукту методом окатування на тарілчастому грануляторі та формоутворення на валковому грануляторі і вироблено дві дослідно-промислові партії NPK добрив у кількості 30 тон. Виконані аналітичні дослідження одержаних комплексних азотно-фосфорно-калійних добрив показали, що метод обкатування дозволяє одержати гранульований продукт із вмістом $P_2O_{5\text{ в.р.}}$ понад 50 % і більшими втратами азоту, а продукт, одержаний методом формоутворення з вмістом $P_2O_{5\text{ в.р.}}$ не більше як 50 % і меншими втратами азоту. За своїми фізико-хімічними властивостями отримані добрива можуть бути застосовані як основні та стартові добрива.

Ключові слова: біомаса; зола; фосфорит; амофос; складне добриво.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Світова спільнота останніми роками розглядає використання місцевих альтернативних джерел енергії, зокрема біомаси, як один із перспективних шляхів вирішення зростаючих проблем енергозабезпечення. Невичерпність ресурсної бази біомаси та її екологічна чистота є визначальними перевагами за умов зменшення ресурсів органічного палива та зростаючих темпів забруднення довкілля. Енергія біомаси є одним із найперспективніших з погляду джерел відновлювальної енергії. Енергію відновлюваних джерел, зокрема біомаси, активно використовують у більшості розвинутих країн світу. Вона забезпечує до 15 % загальносвітового виробництва енергії та належить до найбільш динамічного сектору енергетики країн ЄС, США і Канади [1]. В окремих країнах частка біомаси в загальному споживанні первинних енергоносіїв значно перевищує середньоєвропейську й, наприклад, у Фінляндії становить понад 25 %, у Швеції – 20 % [2].

При цьому паливо з біомаси вже давно визнано вигідним відновлювальним джерелом енергії, особливо в питаннях зниження викидів парникових газів, оксидів азоту й оксиду сірки. Біомаса вуглецево-нейтральна і зазвичай містить мало азоту та сірки [3]. Пряме використання біомаси для одержання енергії є більш екологічно безпечним, ніж, наприклад,

вугілля. При спалюванні біомаси виділяється менше ніж 0,2 % сірки і від 3 % до 5 % золи в порівнянні з 2–3 % і 10–15 % відповідно для вугілля, решта – переважно вуглекислий газ. Крім того, зола біомаси може повернутися в ґрунт як добриво, що забезпечує замкнутість кругообігу біогенних елементів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Активне використання біомаси в енергетичних цілях призводить до утворення великих обсягів золи, що ставить питання складування відходів. Водночас окремі рішення [4] з залучення у виробництво мінеральних добрив золи від спалювання сільськогосподарських культур показали перспективність даного напрямку та потребують додаткових досліджень із підвищення їх споживчих характеристик.

Роль калію для живлення рослин надважлива. Нарівні з азотом і фосфором він входить до групи NPK-добрив, яку неодмінно слід вносити для отримання стабільних врожаїв. У сільському господарстві при внесенні калійних добрив підвищення продуктивності рослин через збільшення накопичення біомаси і урожайності. Так, наприклад, ціна на ячмінь пивоварний може бути вищою на 40–50 % порівняно з фуражним лише завдяки покращенню показників якості (вмісту крохмалю та крупності зерен) за рахунок ефективного удобрення калієм [5].

Сьогодні в Україні виробництво зольних добрив, переважно із спаленого лушпиння соняшника, освоєно ТОВ «Орій» (торгова марка ЕкоПлант) та ТОВ «Алмаз-М» (торгова марка Екосойл). На цих підприємствах методом обкатування зволоженої золи з наступним сушінням і калібруванням виробляються гранульовані добрива з високим вмістом калію. При цьому, рівень фосфору (в перерахунку на P_2O_5) в цих добривах як правило незначний і не перевищує 8 % [6]. Крім високотехнологічних виробництв в Україні працюють ряд підприємств з реалізації фасованої золи як фосфорно-калійного добрива та, зважаючи на високе значення рН золи, як меліоранту для кислих ґрунтів [7]. Через непропорційне зростання ціни на основні добрива, переважно фосфорного компонента, відносно продукції рослинництва впродовж тривалого часу кількість внесених добрив в Україні скоротилася. З року в рік триває зменшення вмісту доступного фосфору в ґрунті [8]. Основним джерелом фосфору для виробництва складних добрив є фосфоритне борошно експортоване з Близького сходу, північної Африки та Казахстану [9]. Внаслідок воєнних дій з'явилися труднощі в логістиці добрив в Україну. Тому ціни на фосфорні та складні добрива високі й поступово продовжують зростати. А існуючі на ринку України добрива на основі золи від спалення решток сільськогосподарських культур мають вкрай обмежені можливості застосування через відсутність у цих добривах водорозчинного фосфору. У зв'язку з цим, актуальним є пошук альтернативних джерел калію й фосфору та створення збалансованих, у першу чергу за фосфором і калієм, водорозчинних комплексних добрив.

Доведено [10], що ефективність калійних добрив значно зростає при комплексному застосуванні разом із азотом і фосфором. Численними дослідженнями [5] показано, що при комплексному застосуванні різних за вмістом добрив, ефективність калію значно збільшується. Тільки за рахунок калію при збалансованому внесенні добрив продуктивність біомаси може збільшуватися на 7,5–10 %.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У зв'язку з тим, що в зольних добривах переважає калій над фосфором та іншими елементами, ефективність цих добрив еквівалентна простим калійним добривам, а саме хлористому й сульфатному калію. Водночас сучасний аграрний ринок потребує складних добрив, що в умовах обмеження поставок закордонної калійної сировини вимагає альтернативних рішень з введення до складу фосфорно-калійних та азотно-фосфорно-калійних добрив саме золи від спалювання решток сільськогосподарських культур. Передбачається, що збагачення золи на фосфор і азот та отримання комплексних водорозчинних добрив

дозволить суттєво розширити марочний асортимент комплексних добрив та одночасно знизити забруднення довкілля золівідвалами.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є зниження техногенного навантаження на довкілля шляхом розроблення рецептур нових марок і технічних рішень щодо екологічно безпечного виробництва складних добрив на основі золи від спалювання сільськогосподарських залишків.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У лабораторних умовах проведено аналітичне визначення фізико-хімічних показників золи, фосфатної сировини (фосфориту і моноамонійфосфату) та отриманих експериментальних добрив на відповідність до нормативної документації. Для досліджень використовувалась зола від спалювання деревини, соломи озимого ріпаку, соняшнику, кукурудзи, озимої пшениці та лушпиння соняшнику.

Безпосередньо для експериментальних досліджень використовували промислову золу лушпиння соняшника, яка серед інших видів золи має найменший рівень контамінації літосферними компонентами і без явних ознак вилугування. При цьому питома вага калію та нерідко фосфору були досить високими. Використовували зразки золи з вмістом K_2O – 13,20–34,70 %; P_2O_5 – 6,90–19,7 %; CaO – 12,19–26,40 % та MgO – 9,30–17,50 %.

Методика проведення експериментів полягала в наступному. За допомогою секундоміра відраховувався час проведення власне грануляції речовин. Одержаний на тарелі продукт розсіювався на фракції, висушувався і знову розсіювався на фракції. Зразки відбиралися в процесі грануляції, після вивантаження продукту з тарелі, до і після сушіння. Готовий продукт висушувався за температури 70 °C та 105 °C в сушильній шафі залежно від марки добрива та визначалися його фізико-хімічні показники згідно з нормативною документацією на складні добрива.

Об'єкт дослідження – вплив золи від спалювання сільськогосподарських культур на довкілля.

Предмет дослідження – екологічно безпечні процеси використання золи від спалювання сільськогосподарських культур у виробництві складних добрив.

Як показали наші дослідження, за вмістом калію найбільш придатними для виробництва добрив може бути зола з лушпиння й соломи соняшнику. Питома вага зразків золи після спалення цих видів біопалива з вмістом калію (в перерахунку на K_2O) понад 20 % становила відповідно 95,6 % та 28,6 %. Кількість зразків із високим вмістом калію в інших золотерахіалах не перевищувала 23,8 %. Наприклад, масова частка золи від спалювання залишків озимої пшениці з вмістом калію у перерахунку на K_2O 10–20 % складає 68,4 % (рис. 1).

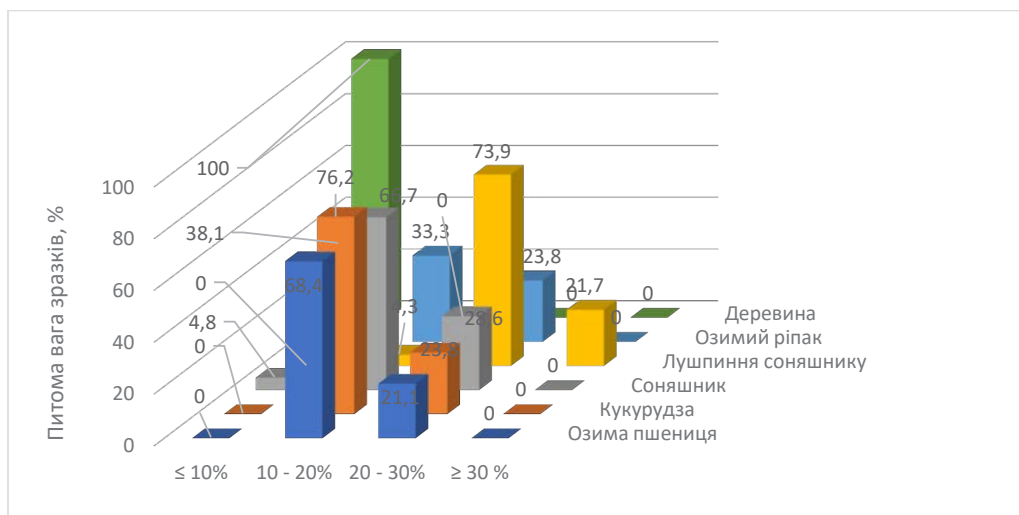


Рис. 1. Групування зразків золи рослинного походження за вмістом калію (у перерахунку на K_2O) з промислових котелів

На першому етапі з метою збагачення зольних добрив на вміст фосфору нами були проведені дослідження з комбінування золи з фосфоритним борошном (питома вага P_2O_5 – 29,20 %, CaO – 30,50 % та MgO – 5,40 %, походження Йорданія). Для подальших експериментальних робіт з одержання добрив проводили подрібнення компонентів до розміру частинок не більше як 0,3 мм. Змішування компонентів у відповідних співвідношеннях по масі проводили за попереднім розрахунком складу готового добрива з подальшим розрахунковим зволоженням суміші. За результатами проведення експерименту порівнювалися значення теоретично розрахованої марки добрива та фактично одержаної за результатами аналітично визначених показників. Модельна установка складалась із тарілчастого гранулятора з діаметром тарелі 500 мм. Таріль встановлена під кутом 45° . Число обертів тарелі – 23 об./хв. Для подачі на таріль сухих та вологих компонентів встановлено дозатор для вивантажування суміші на таріль гранулятора. В ряді дослідів спочатку в змішувачі готувалася шихта з певною вологістю. Наважка сухих компонентів добрив попередньо змішувалася з пластифікатором в змішувачі і за допомогою дозатора подавалася на таріль гранулятора. Подача рідкої фази передбачена в змішувачі і на розпил через форсунку. Гранульований продукт збирався на піддоні.

Для підвищення ефективності й універсальності зольних добрив нами були проведені досліді по збагаченню золи носієм водорозчинного фосфору шляхом приготування сумішей золи з мономоніфосфатом (МАФ). У дослідженнях використовували МАФ з вмістом N – 11–12,40 % та P_2O_5 – 48,0–52,10 %.

У процесі лабораторних досліджень змішували золу з різним вмістом калію і фосфору та МАФ у кількості 20 %, 30 % і 50 %.

З метою зниження енерговитрат на зволоження суміші золи й МАФ та сушіння гранульованого продукту було також проведено досліді з формотворення гранул на валковому грануляторі виробництва «МЕТАЛ ВОРК ГРУП» (м. Суми). Технологія гранулювання сипучих матеріалів або їх сумішей передбачає формування гранул заданого розміру й форми під тиском з і без попереднього зволоження. Під час гранулювання під тиском відбуваються твердофазні фізико-хімічні процеси, пов'язані з трансформацією фізичної структури речовин від утворення стійких кристалічних решіток, цементування та ін. до утворення нових хімічних сполук [11].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На першому етапі проводили дослідження з гранулювання методом окатування золи з лушпиння соняшнику та її суміші з фосфоритом у різних співвідношеннях.

У процесі лабораторних дослідів встановлено, що кількість утворених гранул (1–6 мм) не перевищувала 50 % від завантаженої суміші в гранулятор. При збільшенні вологості золи до 60 % вихід продукту збільшився до 95 %. При цьому, фосфорит і його суміш із золою добре утворювали гранули при вологості до 30 % з виходом товарної продукції (понад 1 мм) – 95,0–95,7 % (табл. 1).

Після сушіння при $65\text{--}75^\circ\text{C}$ до вологості гранул менше ніж 5 % нами було проведено комплекс фізико-хімічних досліджень добрив.

Встановлено, що втрати маси компонентів добрив у процесі їх змішування, зволоження, грануляції та сушіння становили 0,55–1,75 %. При цьому, не виявлено істотної різниці втрат в залежності від співвідношення компонентів при гранулюванні добрив у даному експерименті.

Таблиця 1. Характеристика комплексних добрив, вироблених за технологією обкатування на тарілчастому грануляторі на основі золи лушпиння соняшника та йорданського фосфориту

Показник	Сировинні компоненти			
	100 % зола	100 % фосфорит	50 % фосфориту, 50 % золи	70 % фосфориту, 30 % золи
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (фактичний), %	11,60	29,20	20,30	23,60
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (розрахунковий), %	-	-	20,40	23,90
Відхилення значень P_2O_5 фактичного від розрахункового, %	-	-	0,49	1,34
Масова частка цитраторозчинного фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (засвоюваний) (фактичний), %	6,80	22,00	12,5	15,80
Фактичне співвідношення значень P_2O_5 цитраторозчинного до загального	0,586	0,753	0,616	0,669
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P_2O_5 , %	0,0	0,0	0,0	0,0
Масова частка загального калію, у перерахунку на K_2O (фактичний), %	24,50	0,0	12,2	7,30
Масова частка загального калію, у перерахунку на K_2O (розрахунковий), %	-	-	12,3	7,40
Відхилення значень K_2O фактичного від розрахункового, %	-	-	0,82	1,36
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (фактичний), %	18,10	30,50	24,2	21,15
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (розрахунковий), %	-	-	24,3	21,82
Відхилення значень CaO фактичного від розрахункового, %	-	-	0,41	3,07
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (фактичний), %	9,30	5,40	7,5	6,70
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (розрахунковий), %	-	-	7,35	6,57
Відхилення значень MgO фактичного від розрахункового, %	-	-	-2,04	-1,98
Масова частка води (H_2O), %	2,3	1,96	1,32	1,49
Показник активності водневих іонів (реакція водного середовища), pH	11,3	7,20	11,00	10,80
Статична міцність, МПа	2,48	1,15	1,76	1,41

Фактичний вміст калію й фосфору у комплексних добривах (гранули розміром 1–6 мм) дещо відрізнявся від розрахункового. Але відмінності були незначними. Залежно від компонування добрив фактичний вміст фосфору був меншим на 0,49–1,34 % від розрахункового, калію – 0,82–1,36 %. У композиціях добрив на основі фосфориту й золи, як і в сировинних компонентах, переважали цитратні форми фосфору. Співвідношення цитратного до загального P_2O_5 в комплексних добривах на основі фосфориту й золи становило 0,616–0,669 при значенні цього показника в сировинних компонентах – 0,586–0,763.

При введенні в золу подрібненого гранульованого або кристалічного МАФ та змочуванні суміші до 30 % з подальшим гранулюванням на модельному тарілчастому грануляторі спостерігалось виділення

вуглекислоти та амоніаку, а екзотермічний процес був виражений незначно.

Втрата маси суміші золи й МАФ після їх грануляції та сушіння при 65–75°C становила, залежно від співвідношення компонентів, від 0,96 % до 2,63 %. При цьому найбільшою була втрата маси при найменших кількостях внесеного в золу МАФ. У процесі грануляції суміші золи й МАФ одержано не менше 98,5 % гранул розміром понад 1 мм. При цьому товарна фракція добрив розміром від 2 мм до 4 мм складала до 75 % від маси. Статична міцність гранул добрив, отриманих при змішуванні золи й МАФ була дещо менша від гранульованої золи, але вища від гранульованого моноамонійфосфату.

Використання для збагачення золи МАФ дозволило отримувати гранульовані комплексні добрива

не тільки з водорозчинним фосфором, але й азотом. Проте більш контрольований вміст азоту в добривах вдавалося отримувати при змішуванні золи й МАФ у рівних або близьких пропорціях, при зменшенні частки МАФ в суміші фактичний вміст азоту на 20,76 % був меншим від розрахункового.

Контрольованим вміст водорозчинного фосфору також був при змішуванні компонентів у однакових пропорціях. При збільшенні питомої ваги золи кількість фактичного водорозчинного фосфору

в добривах значно зменшувалася відносно розрахункового. Так, при співвідношенні зола : МАФ – 1,15 : 1 відхилення вмісту P_2O_5 фактичного від розрахункового становило 4,75 %, при пропорції 2 : 1 – 28,70 %. При цьому, рівні вмісту фактичного і розрахункового загального фосфору не змінювалися (табл. 2).

У наступному експерименті проводилося гранулювання сумішей золи з різним вмістом фосфору й калію та МАФ при змочуванні сумішей до 40 % на модельній тарілчастій установці. Схема досліджень

Таблиця 2. Фізико-хімічні характеристики добрив із золи лущиння соняшника та МАФ, вироблених на тарілчастому грануляторі

Показник	Компоненти			
	48 % МАФ, 100% P_2O_5	100 % зола	53,5 % золи, 46,5 % МАФ	66,7 % золи, 33,3 % МАФ
Масова частка загального азоту, N (фактичний), %	11,00	-	4,63	2,90
Масова частка загального азоту, N (розрахунковий), %	-	-	5,12	3,66
Відхилення значень азоту фактичного від розрахункового, %	-	-	9,57	20,76
Масова частка калію, у перерахунку на K_2O (фактичний), %	-	34,00	16,53	19,54
Масова частка калію, у перерахунку на K_2O (розрахунковий), %	-	-	18,19	22,68
Відхилення значень калію фактичного від розрахункового, %	-	-	9,13	13,84
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (фактичний), %	48,00	19,00	32,90	28,96
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (розрахунковий), %	-	-	32,56	28,60
Відхилення значень загального фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	-1,04	-1,26
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (фактичний), %	47,50	0,0	21,04	11,28
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (розрахунковий), %	-	-	22,09	15,82
Відхилення значень водорозчинного фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	4,75	28,70
Фактичне співвідношення P_2O_5 водорозчинного до загального	-	-	0,640	0,390
Розрахункове співвідношення P_2O_5 водорозчинного до загального	-	-	0,678	0,553
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (фактичний), %	-	17,40	9,5	12,25
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (розрахунковий), %	-	-	9,31	11,61
Відхилення значень кальцію фактичного від розрахункового, %	-	-	-2,04	-5,51
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (фактичний), %	-	16,05	8,75	10,8
Відхилення значень магнію фактичного від розрахункового, %	-	-	-1,86	-0,84
Масова частка води, H_2O , %	2,59	2,16	3,56	3,700
Показник активності водневих іонів (реакція водного середовища), pH	5,12	10,3	7,20	9,10
Статична міцність, МПа	1,78	2,86	2,35	2,56

була подібна, за виключенням якості використаної зольної сировини.

Отримані результати були подібними до попередніх. Однак при збільшенні вологості сумішей до 40 % неконтрольовані втрати азоту зростали. Так, рівні відхилення фактичного від розрахункового вмісту

азоту були більшими на 3,43–9,32 %, ніж при вологості 30 % (табл. 2, 3 і 4).

З метою підтвердження правильності вибору матеріалів і технології збагачення золи, з'ясування причин, пошуку шляхів оптимізації та для розробки моделі прогнозування втрат амонійного азоту

Таблиця 3. Характеристика комплексних добрив із золи лушпиння соняшника з високим вмістом фосфору та МАФ, вироблених за технологією обкатування на тарілчастому грануляторі при зволоженні суміші до 40 %

Показник	Компоненти				
	100% МАФ, (52% P_2O_5)	100 % зола ¹ з високим вмістом фосфору	50 % золи ¹ , 50 % МАФ	70 % золи ¹ , 30 % МАФ	80 % золи ¹ , 20 % МАФ
Масова частка азоту, у перерахунку на N (фактичний), %	12,30	-	5,32	2,69	1,69
Масова частка азоту, у перерахунку на N (розрахунковий), %	-	-	6,15	3,69	2,46
Відхилення значень азоту фактичного від розрахункового, %	-	-	13,00	27,10	31,30
Масова частка калію, у перерахунку на K_2O (фактичний), %	-	26,67	12,95	17,95	20,15
Масова частка калію, у перерахунку на K_2O (розрахунковий), %	-	-	13,34	18,67	21,34
Відхилення значень калію фактичного від розрахункового, %	-	-	2,92	3,56	5,58
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (фактичний), %	52,00	19,97	34,84	28,90	25,92
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (розрахунковий), %	-	-	35,98	29,55	26,38
Відхилення значень загального фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	3,17	2,20	1,74
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (фактичний), %	51,50	0,0	24,44	13,72	7,85
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P_2O_5 (розрахунковий), %	-	-	25,75	15,45	10,30
Відхилення значень водорозчинного фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	5,05	11,20	23,79
Фактичне співвідношення P_2O_5 водорозчинного до загального	-	-	0,701	0,475	0,303
Розрахункове співвідношення P_2O_5 водорозчинного до загального	-	-	0,716	0,523	0,390
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (фактичний), %	-	12,19	6,25	9,15	10,68
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (розрахунковий), %	-	-	6,1	8,53	9,75
Відхилення значення кальцію фактичного від розрахункового, %	-	-	-2,46	-7,27	-9,54
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (фактичний), %	-	10,55	5,78	7,95	8,73
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (розрахунковий), %	-	-	5,28	7,39	8,44
Відхилення значень магнію фактичного від розрахункового, %	-	-	-9,47	-7,58	-3,44
Масова частка води, H_2O , %	2,59	2,86	3,56	4,150	4,68
Показник активності водневих іонів (реакція водного середовища), pH	4,85	10,56	6,15	6,80	7,30
Статична міцність, МПа	1,85	2,74	1,95	2,15	2,45

Таблиця 4. Характеристика комплексних добрив із золи лушпиння соняшника збідненої на фосфор та МАФ, вироблених за технологією обкатування на тарілчастому грануляторі при зволоженні суміші до 40 %

Показник	Компоненти			
	100% МАФ, (52% P ₂ O ₅)	Зола ² з невисоким вмістом фосфору, 100%	50% золи ² , 50% МАФ	70% золи ² , 30% МАФ
Масова частка азоту, у перерахунку на N (фактичний), %	12,30	-	5,15	2,58
Масова частка азоту, у перерахунку на N (розрахунковий), %	-	-	6,15	3,69
Відхилення значень азоту фактичного від розрахункового, %	-	-	16,26	30,08
Масова частка калію, у перерахунку на K ₂ O (фактичний), %	-	33,94	16,25	22,35
Масова частка калію, у перерахунку на K ₂ O (розрахунковий), %	-	-	16,97	23,76
Відхилення значень калію фактичного від розрахункового, %	-	-	4,24	5,93
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (фактичний), %	52,00	7,30	29,58	20,15
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (розрахунковий), %	-	-	29,65	20,71
Відхилення значень загального фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	0,24	2,7
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (фактичний), %	51,500	0,0	22,10	7,13
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (розрахунковий), %	-	-	25,75	15,45
Відхилення значень водорозчинного фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	14,17	46,15
Фактичне співвідношення P ₂ O ₅ водорозчинного до загального	-	-	0,747	0,354
Розрахункове співвідношення P ₂ O ₅ водорозчинного до загального	-	-	0,868	0,746
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (фактичний), %	-	15,73	8,15	12,15
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (розрахунковий), %	-	-	7,86	11,01
Відхилення значення кальцію фактичного від розрахункового, %	-	-	-3,69	-10,35
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (фактичний), %	-	10,05	5,35	7,65
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (розрахунковий), %	-	-	5,03	7,04
Відхилення значень магнію фактичного від розрахункового, %	-	-	-6,36	-8,66
Масова частка води, H ₂ O, %	2,59	3,56	3,78	4,10
Показник активності водневих іонів (реакція водного середовища), pH	4,85	11,25	6,90	8,40
Статична міцність, МПа	1,85	3,15	2,10	2,35

й водорозчинного фосфору нами апробована технологія виробництва зольних добрив на валковому грануляторі.

Перед гранулюванням окремі компоненти та суміші змочували водою, вологість суміші варіювали від 1,5 % до 10 %. При роботі з матеріалами з більшою вологістю робота гранулятора була ускладнена

через залипання впадин валків сумішню грануляту. При цьому якість гранул значно знижувалася.

Під час грануляції тільки золи при зволоженні її до 30 % процес агломерації відбувався незадовільно.

Незалежно від хімічного складу, зола при зволоженні до 10 % гранулювалася, але статична міцність гранул після сушіння не перевищувала 0,25 МПа. Отже, при

відсутності достатньої кількості води цементування золи було недостатнім. У зв'язку з цим, дана технологія виробництва тільки зольних добрив виявилася непридатною. Проте при поєднанні золи з МАФ вдавалося отримувати однакові за розміром гранули зі статичною міцністю від 1,85 МПа до 2,50 МПа (табл. 5 і 6).

Втрата маси сумішей золи й МАФ після їх грануляції на валковому грануляторі й сушіння при 65–75 °С була дещо менше, ніж на тарілчастому грануляторі, та становила в залежності від співвідношення компонентів від 0,55 % до 1,55 %. При цьому найбільшою втрата маси була також при найменших кількостях внесеного в золу МАФ.

При грануляції суміші добрив на основі золи з МАФ вдавалося отримувати гранули переважно фракції 2–4 мм до 90 % від маси.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Слід зазначити, що при створенні комплексних добрив на основі фосфориту й золи отримували

гранули з більш високим рівнем міцності в порівнянні з гранулюванням тільки фосфориту. Так, в експериментальних композиціях статична міцність гранул із сумішей становила 1,41–1,76 МПа, при міцності фосфоритних гранул – 1,15 МПа (табл. 1).

Одержані під час лабораторних дослідів перспективні продукти й результати вивчення їхніх фізико-хімічних властивостей свідчать про те, що шляхом поєднання в одній гранулі фосфориту й золи можна провадити корегування вмісту фосфору в зольних добривах. При цьому в процесі виробництва фосфорно-зольних добрив є можливість істотно скоротити витрати води й витрати на сушіння готової продукції та підвищити їх агрохімічну цінність. До того ж через відсутність у фосфорно-зольних добривах водорозчинних форм фосфору дані композиції добрив будуть доречними у системах удобрень сільськогосподарських культур для оптимізації вмісту валового фосфору у збіднених ґрунтах та для компенсації виносу

Таблиця 5. Фізико-хімічні показники комплексних добрив із золи лушпиння соняшника з високим рівнем фосфору та МАФ, вироблених на валковому грануляторі

Показник	Компоненти			
	100 % МАФ (моноамоній фосфат)	100% золи ³	50% золи ³ , 50% МАФ	70% золи ³ , 30% МАФ
Масова частка азоту, у перерахунку на N (фактичний), %	12,40	-	6,05	3,51
Масова частка азоту, у перерахунку на N (розрахунковий), %	-	-	6,20	3,70
Відхилення значень азоту фактичного від розрахункового, %	-	-	2,42	5,14
Масова частка калію, у перерахунку на K ₂ O (фактичний), %	-	13,20	6,51	8,91
Масова частка калію, у перерахунку на K ₂ O (розрахунковий), %	-	-	6,60	9,24
Відхилення значень калію фактичного від розрахункового, %	-	-	1,36	3,57
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (фактичний), %	52,10	15,30	33,15	25,50
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (розрахунковий), %	-	-	33,70	26,34
Відхилення значень загального фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	1,63	3,19
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (фактичний), %	51,20	0,0	19,80	9,20
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (розрахунковий), %	-	-	25,6	15,4
Відхилення значень водорозчинного фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	22,66	40,10
Фактичне співвідношення P ₂ O ₅ водорозчинного до загального	-	-	0,597	0,361
Розрахункове співвідношення P ₂ O ₅ водорозчинного до загального	-	-	0,760	0,583
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (фактичний), %	-	17,30	9,2	12,8
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (розрахунковий), %	-	-	8,65	12,1
Відхилення значення кальцію фактичного від розрахункового, %	-	-	-6,36	-5,79
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (фактичний), %	-	13,40	6,80	7,15
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (розрахунковий), %	-	-	6,70	6,90
Відхилення значень магнію фактичного від розрахункового, %	-	-	-1,49	-3,62
Масова частка води, H ₂ O, %	2,58	2,75	3,85	3,58
Показник активності водневих іонів (реакція водного середовища), pH	4,75	10,35	6,93	8,75
Статична міцність, МПа	1,95	< 0,25	1,85	2,10

Таблиця 6. Характеристика комплексних добрив із золи лушпиння соняшника з невисоким рівнем фосфору та МАФ, вироблених на валковому грануляторі

Показник	Компоненти			
	100 % МАФ (моноамоній фосфат)	100% золи ⁴	50% золи ⁴ + 50% МАФ	70% золи ⁴ + 30% МАФ
Масова частка азоту, у перерахунку на N (фактичний), %	12,40	-	6,00	3,45
Масова частка азоту, у перерахунку на N (розрахунковий), %	-	-	6,20	3,70
Відхилення значень азоту фактичного від розрахункового, %	-	-	3,23	6,76
Масова частка калію, у перерахунку на K ₂ O (фактичний), %	-	34,7	17,23	23,60
Масова частка калію, у перерахунку на K ₂ O (розрахунковий), %	-	-	17,35	24,29
Відхилення значень калію фактичного від розрахункового, %	-	-	0,69	2,84
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (фактичний), %	52,10	6,90	28,73	19,50
Масова частка загального фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (розрахунковий), %	-	-	29,50	20,46
Відхилення значень загального фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	2,61	4,69
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (фактичний), %	51,20	0,0	14,90	6,35
Масова частка водорозчинного фосфору, у перерахунку на P ₂ O ₅ (розрахунковий), %	-	-	25,60	15,40
Відхилення значень водорозчинного фосфору фактичного від розрахункового, %	-	-	41,80	58,66
Фактичне співвідношення P ₂ O ₅ водорозчинного до загального	-	-	0,519	0,326
Розрахункове співвідношення P ₂ O ₅ водорозчинного до загального	-	-	0,868	0,751
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (фактичний), %	-	26,4	14,25	19,15
Масова частка кальцію, у перерахунку на CaO (розрахунковий), %	-	-	13,2	18,5
Відхилення значення кальцію фактичного від розрахункового, %	-	-	-7,95	-3,51
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (фактичний), %	-	17,50	8,83	9,35
Масова частка магнію, у перерахунку на MgO (розрахунковий), %	-	-	8,75	9,00
Відхилення значень магнію фактичного від розрахункового, %	-	-	-0,91	-3,89
Масова частка води, H ₂ O, %	2,58	3,15	3,75	3,61
Показник активності водневих іонів (реакція водного середовища), pH	4,75	11,23	7,25	9,25
Статична міцність, МПа	1,95	< 0,25	2,18	2,48

фосфору з урожаєм. У зв'язку з тим, що засвоюваність цитратного фосфору при формуванні урожаю в рік його внесення під зернові культури не перевищує 12 %, під технічні – 23 %, ефективність фосфорного компоненту у збільшенні урожайності може не перевищувати 2–4 % [10].

Незалежно від якості золи вдавалося точно контролювати вміст загального фосфору й калію. Відхилення фактичного від розрахункового вмісту калію і загального фосфору у дослідях не перевищували 5 %. Для калію та загального фосфору ці показники становили відповідно від 0,69 % до 3,57 % та від 1,63 % до 4,69 % (табл. 5 і 6).

Використання МАФ для збагачення золи водорозчинним фосфором і азотом шляхом модифікування рослинної золи, багатой на калій, є перспективним напрямком для виробництва складних комплексних добрив. При змішуванні золи й МАФ вдавалося

отримувати комплексні гранульовані добрива з азотом, загальними і водорозчинними фосфором та калієм. При цьому отримані гранули добрив характеризувалися високою статичною міцністю, що є важливим технологічним показником.

Встановлено, що вміст калію та частково загального фосфору в отриманих нами комплексних зольних гранульованих добривах залежав від якості зольної сировини, загального та водорозчинного фосфору й азоту – від кількості використаного для збагачення золи МАФ.

Однак при виробництві добрив із збагаченої МАФ золи на тарілчастому грануляторі виявлено труднощі щодо контролю та прогнозуванню вмісту азоту й водорозчинного фосфору.

Втрати азоту й водорозчинного фосфору у добривах при валковій грануляції аналізували в експерименті з різнопропорційними сумішами МАФ та золи з високим і низьким вмістом фосфору.

Встановлено, що втрати азоту при валковій грануляції були значно меншими в порівнянні з грануляцією на тарілці. На валковому грануляторі відхилення фактичного від розрахункового вмісту азоту становили 2,42–6,76 %, що в 3,95–4,63 разів менше, ніж при грануляції на тарілчастому грануляторі.

Проте при використанні валкового гранулятора втрати водорозчинного фосфору збільшувалися. Так, відхилення фактичного від розрахункового вмісту фосфору становили від 22,66 % до 58,66 %, що в 1,3–4,77 разів більше, ніж при грануляції на тарілці.

Найбільшими втрати водорозчинного фосфору виявляли при використанні збідненої на фосфор золи. В залежності від кількості МАФ у суміші з золою з невисоким вмістом фосфору відхилення фактичного від розрахункового вмісту фосфору становили від 41,80 % до 58,66 %, в суміші з багатою на фосфор золою – від 22,66 % до 40,10 % (табл. 5 і 6).

Результати лабораторних досліджень гранулювання сумішей золи й МАФ дозволили організувати перевірку розроблених технічних рішень у дослідно-промислових умовах при одержанні гранульованих NPK добрив на тарілчастому грануляторі на ТОВ «Орій» і валковому грануляторі на ТОВ «Мінералз ГРУП» з виробництвом дослідних партій продукту в кількості 30 тон.

Проведені вегетаційні дослідження розроблених рецептур добрив показали їх агрохімічну ефективність, що дає підставу для впровадження розширеної номенклатури стартових добрив і добрив для основного внесення.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження довели можливість використання вторинної продукції рослин-

ництва – накопиченої золи, яка потребує облаштування золовідвалів на значних площах, для генерації енергії.

Лабораторні й дослідно-промислові дослідження з підвищення споживчої цінності золи від спалювання решток сільськогосподарських культур шляхом модифікування їх складу фосфоровмісною та азотовмісною сировиною показали можливість одержання складних РК та NPK добрив різних марок. Доведено можливість корегування складу РК та NPK добрив на основі вмісту фосфору і калію у золі до оптимальних значень поживних речовин у складному добриві.

Невисокий вміст фосфору та високий вміст калію у зольній сировині дозволяють при її модифікації фосфоритом одержати збалансоване добриво марок P_2O_5 – 20–23 % і K_2O – 7–10 %. При цьому використання технології обкатування на тарілчастому грануляторі дозволяє контролювано виробляти композиції фосфорно-калійних зольно-фосфоритних добрив з широким діапазоном (P_2O_5 – 10–25 %, K_2O – 5–35 %) вмісту елементів живлення.

Для отримання універсальних комплексних азотно-фосфорно-калійних добрив з водорозчинними азотом і фосфором на основі золи відпрацьовано технології виробництва добрив за технологіями обкатування на тарілчастому і валковому грануляторі з одержанням складних добрив марки NPK.

Фізико-хімічні властивості комплексних азотно-фосфорно-калійних добрив мають аналогічні показники, при цьому метод обкатування дозволяє одержати гранульований продукт із вмістом P_2O_5 в.р. понад 50 % і більшими втратами азоту, а продукт, одержаний методом формоутворення з вмістом P_2O_5 в.р. не більше як 50 % і меншими втратами азоту.

REFERENCES

- [1] Polianskyi O. S., Diakonov O. V., Skrypyk O. S., Fesenko G. V., Diakonov V. I., Kharchenko Yu. V., Torosov A. S., & Voloshchenko V. V. (2017). *Napriamy rozvytku alternatyvnykh dzherel enerhii: aktsent na tverdomu biopalyvi ta hnuchkykh tekhnolohiiakh yoho vyhotovlennia* [Development directions of alternative energy sources: emphasis on solid biofuel and flexible technologies for its production]. Kharkiv: Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov. P. 136 [in Ukrainian].
- [2] Dibácz Z. (2010) *Study on Biomass Trade in Poland*. Energy Centre- Energy Efficiency, Environment and Energy Information Agency Non-profit Limited Company. Received from: http://www.central2013.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/outputlib/4biomas s_Hungary_trade_study_uploaded.pdf
- [3] Agbor, E., Zhang, X., & Kumar, A. (2014). A review of biomass co-firing in North America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 930–943.
- [4] Dorohan H.O. (2023) *Pytannia utylizatsii vidkhodiv promyslovosti v khimichnii tekhnolohii tsementu* [The issue of industrial waste utilization in chemical cement technology]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho*, vol. 34 (73), no. 2, pp. 8–14 (in Ukrainian).
- [5] Biliera N. (2018) *Kalii – element yakosti abo osoblyvosti kaliinoho zhyvlennia roslyn* [Potassium is an element of quality or features of potassium plant nutrition]. *Agronom*, 2.11.2018. Retrieved from: <https://www.agronom.com.ua/kalij-element-yakosti-abo-osoblyvosti-kalijnogo-zhyvlennia-roslyn/> [in Ukrainian].
- [6] *Derzhavnyi reiestr pestytsydiv i ahrokhimikativ, dozvolenykh do vykorystannia v Ukraini* [State register of pesticides and agrochemicals approved for use in Ukraine]. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reiestr-pestytsydiv-i-agrokhimikativ-dozvolenykh-do-vykorystannia-v-ukraini/> [in Ukrainian].
- [7] Kramar V. H. (2020) *Obgruntuvannia napriamiv utylizatsii zoly vid spaliuvannia biomasy. Zola biomasy yak dobryvo v silskomu hospodarstvi* [Justification of utilization directions of ash from biomass combustion. Biomass ash as fertilizer in agriculture], *UABIO № 27*, 2020. Retrieved from: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/12/AZ_Kramar_Zastosuvannya-zoly-biomasy-yak-dobryva_fin_ukr2.pdf [in Ukrainian].

- [8] Zarechenyi V. G., Karpovych E. O., Vorobiova I. P., Vakal S. V., & Trofimenko M. O. (2004). Vyrobnystvo fosforovmisnykh mineralnykh dobryv pidpriemstvamy Ukrainy ta yikh vykorystannia v silskomu hospodarstvi [Production of phosphorus-containing mineral fertilizers by Ukrainian enterprises and their use in agriculture]. Sumy: Universytetska knyha, p. 189 [in Ukrainian].
- [9] Vakal S. V. (2018) Naukovo-teoretychni osnovy stvorennia novykh ekolohichno bezpechnykh tekhnolohichnykh protsesiv vyrobnytstv fosforovmisnykh dobryv [Scientific and theoretical foundations of creating new ecologically safe technological processes for the production of phosphorus-containing fertilizers]: Doctor's thesis. Sumy: SSU, p. 422 [in Ukrainian].
- [10] Hrekov V. O., Datsko L. V., Zhylkin V. A., Maistrenko M. I. (2011). Metodychni vkazivky z okhorony hruntiv [Methodological instructions for soil protection]. K., p. 108 [in Ukrainian].
- [11] Petriaiev M. V., Poliakova Yu. P., Toporov A. A., Tretiakov P. V. (2019). Porivnialno-ohliadova kharakterystyka ekstrudernykh ta hranuliatsiinykh ustanovok [Inspection characteristics of extruder and granulation plants]. Naukovi pratsi DonNTU: Mashynobuduvannia i mashynoznavstvo, no. 1(16) [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Полянський О. С., Дьяконов О. В., Скрипник О. С., Фесенко Г. В., Д'яконов В. І., Харченко Ю. В., Торосов А. С., Волощенко В. В. (2017). Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення: монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. С. 136.
- [2] Dibáci Z. (2010). *Study on Biomass Trade in Poland*. Energy Centre- Energy Efficiency, Environment and Energy Information Agency Non-profit Limited Company. Received from: http://www.central2013.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/outputlib/4biomas s_Hungary_trade_study_uploaded.pdf
- [3] Agbor, E., Zhang, X., & Kumar, A. (2014). A review of biomass co-firing in North America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 930–943.
- [4] Дорогань Н. О. (2023). Питання утилізації відходів промисловості в хімічній технології цементу // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, Том 34 (73), № 2. С. 8–14.
- [5] Білера Н. (2018). Калій – елемент якості або особливості калійного живлення рослин [Електронний ресурс] // Агроном. 2.11.2018. Режим доступу до журн. : <https://www.agronom.com.ua/kalij-element-yakosti-abo-osoblyvosti-kalijnogo-zhyvlennya-roslyn/>
- [6] Державний реєстр пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini/>
- [7] Крамар В. Г. (2020). Обґрунтування напрямів утилізації золи від спалювання біомаси. Зола біомаси як добриво в сільському господарстві / Аналітична записка UABIO № 27. Режим доступу: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/12/AZ_Kramar_Zastosuvannya-zoly-biomasy-yak-dobryva_fin_ukr2.pdf
- [8] Заречений В. Г., Карпович Е. О., Воробйова І. П., Вакал С. В., Трофименко М. О. (2017). Виробництво фосфоровмісних мінеральних добрив підприємствами України та їх використання в сільському господарстві: монографія; за ред. В.Г. Зареченого. Суми : Університетська книга. С.189.
- [9] Вакал С. В. (2018) Науково-теоретичні основи створення нових екологічно безпечних технологічних процесів виробництв фосфоровмісних добрив [Текст]: дисертація ... д-ра техн. наук, спец.: 21.06.01 - екологічна безпека ; наук. консультант М.С. Мальований. Суми: СумДУ. С. 422
- [10] Греков В. О., Дацько Л. В., Жилкін В. А., Майстренко М. І. (2011). Методичні вказівки з охорони ґрунтів. С. 108
- [11] Петряєв М. В., Полякова Ю. П., Топоров А. А., Трет'яков П. В. (2019). Порівняльно-оглядова характеристика екструдерних та грануляційних установок : Наукові праці ДонНТУ : Машинобудування і машинознавство. № 1(16).

© Гурець Л. Л., Ізоденова Т. І., Вакал В. С., Вакал С. В., Клименко О. Г.

Дата надходження статті до редакції: 29.02.2024

Дата затвердження статті до друку: 08.03.2024