

**RESEARCH ON THE PRODUCTION PROCESS OF SAPROPEL-BASED GRANULAR FERTILIZER**S. Khomych<sup>1\*</sup>, I. Tsiz<sup>1</sup>, R. Ferents<sup>2</sup><sup>1</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine<sup>2</sup>Limited Liability Company «VOLYN-ZERNO-PRODUKT», Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES

**AM**  
**СМ**

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

**ABSTRACT**

Organic fertilizers, which minimize harmful effects and stabilize or even increase the humus content, have a positive effect on the soil. Among various organic fertilizers, sapropel-based fertilizers have a positive effect on the soil. It is also recommended to use organo-mineral fertilizers containing sapropel and mineral components of natural minerals. Such fertilizers ensure healthy development of plants during cultivation. The granules of such fertilizers should have a spherical shape, which allows them to be applied to the soil with traditional machines. With the help of combined granulator-dryer it is possible to produce granules from organo-mineral raw materials quickly and with high quality. In the article the production process of granulated fertilizers on the basis of highly organic sapropel is studied and the design of a machine for its implementation is proposed. As a raw material for the production of fertilizers it is proposed to use organic sapropel, which is naturally dehydrated to a moisture content of 77–80%. On the basis of the literature analysis, a scheme of a machine for the production of granulated fertilizers (dryer-granulator) was proposed and its production process was reproduced in laboratory conditions. Contact and convective drying methods with preliminary grinding and rolling of raw materials were used to form spherical fertilizer granules. These processes are proposed to be carried out simultaneously in a drum drying chamber with a cascade drying and grinding nozzle. During a complex of experimental studies of the characteristics of fertilizer granules, their fractional composition, moisture content, strength and density were determined. The proposed method of obtaining organo-mineral fertilizers is promising, but requires further research into the use of various types of mineral components from local deposits in the granules, as well as the mechanism of influence of these fertilizers on the yield of agricultural crops and soil properties.

**Key words:**

granular fertilizers,  
organic sapropel,  
organic fertilizers,  
sapropel processing,  
production of fertilizers

**Article history:**

Received 29.05.2024

Accepted 20.06.2024

**\*Corresponding author:**

smhh@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi50.1422

**To cite this article:**

Khomych, S., Tsiz, I., & Ferents, R. (2024). Research on the production process of sapropel-based granular fertilizer. *Agricultural Machines*, 50, 136-147. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1422>

УДК 631.3:631.8

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ ДОБРИВ НА ОСНОВІ САПРОПЕЛЮ

С.М. Хомич<sup>1\*</sup>, І.Є. Цизь<sup>1</sup>, Р.В. Ференц<sup>2</sup><sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>ТзОВ «ВОЛИНЬ-ЗЕРНО-ПРОДУКТ», Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES

**АМ**  
**СМ**

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

### АНОТАЦІЯ

Позитивний вплив на ґрунт мають органічні добрива, які мінімізують шкідливий вплив та стабілізують або ж навіть підвищують вміст гумусу. З-поміж різних органічних добрив позитивний вплив на ґрунт мають добрива, що утворені на основі сапропелю. Доцільно також використовувати органо-мінеральні добрива, до складу яких входить сапропель та мінеральні компоненти природних корисних копалин. Такі добрива забезпечують здоровий розвиток рослин під час вирощування. Гранули добрив повинні мати кулькоподібну форму, що дозволить їх вносити у ґрунт традиційними машинами. Швидко та якісно виготовити гранули з органо-мінеральної сировини можна за допомогою комбінованих сушарок-грануляторів. Досліджено процес виробництва гранульованих добрив на основі високоорганічного сапропелю та запропоновано конструкцію машини для його реалізації. В якості сировини для виробництва добрив запропоновано використовувати органічний сапропель, що природно зневоднений до вологості 77–80%. На основі проведеного літературного аналізу запропоновано схему машини для виробництва гранульованих добрив (сушарку-гранулятор) та у лабораторних умовах відтворено її виробничий процес. Для формування гранул добрив, що мають кулькоподібну форму, використовували контактний та конвективний способи сушіння з попереднім подрібненням і обкочуванням сировини. Ці процеси запропоновано виконувати одночасно у барабанній сушильній камері з каскадною насадкою. Під час комплексу експериментальних досліджень характеристик гранул добрив визначено їх фракційний склад, вологість, міцність та щільність. Запропонований спосіб отримання органо-мінеральних добрив є перспективним, але вимагає подальшого дослідження використання у складі гранул різних видів мінеральних компонентів з місцевих родовищ, а також механізму впливу цих добрив на урожайність.

#### Ключові слова:

гранульовані добрива,  
органічний сапропель,  
органічні добрива,  
перероблення сапропелю,  
виробництво добрив

#### Історія публікації:

Отримано 29.05.2024

Затверджено 20.06.2024

#### \*Автор для листування:

smhh@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi50.1422

#### Цитувати цю статтю:

Хомич, С. М., Цизь, І. Є., & Ференц, Р. В. (2024). Дослідження процесу виробництва гранульованих добрив на основі сапропелю. *Сільськогосподарські машини*, 50, 136-147. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1422>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Рілля, яка систематично обробляється та перебуває під постійним доглядом, зрештою виснажується, втрачає власні запаси гумусу та швидко деградує (*Мольчак та ін., 1998; Flint & Flint, 2002; Балюк та ін., 2017*). Під час інтенсивного використання ріллі має місце її втомлюваність. Це явище пришвидшується внаслідок внесенням добрив, гербіцидів й фунгіцидів, а також несприятливих природно-кліматичних чинників. Як результат цього, з'являються нові хвороби ґрунту та дефіцит гумусу. Рільництво потребує трудомістких ґрунтообробних робіт та внесення дорогих мінеральних добрив та препаратів, без яких урожайність сільськогосподарських культур є низькою. Доцільність хімічного оброблення рослин та внесення штучних добрив у ґрунт визначається на основі аналізу вмісту гумусу та складу ґрунту з обґрунтуванням певних норм їх внесення. Однак аграрії, переважно, не дотримуються цих норм і можуть перевищити їх у кілька разів аби досягти високих урожаїв, що і спричиняє виснаження та зараження ґрунтів. Також причинами підвищення норм хімічної дії на окремі ділянки ґрунту можуть бути природно-кліматичні умови та ерозії (*Мольчак та ін., 1998; Бомба, 2001; Flint & Flint, 2002*). Удобрення та збільшення норм використання мінеральних добрив – це не єдиний шлях для отримання високого урожаю, оскільки у цьому випадку його збільшення відбувається лише у рік застосування цих норм, а шкода для ґрунту залишиться на роки, що може спричинити також погіршення якості урожаю. Для досягнення нейтрального рівня деградації ґрунтів та збереження й підвищення рівня гумусу у ґрунті, необхідно дотримуватись законодавства України щодо органічного землеробства (*Закон України, 2018*) та виробляти продукцію належної якості шляхом використання альтернативних видів добрив. Оскільки погіршення земельної безпеки спричинить ще більший розвиток захворювань ґрунту та скорочення площ ріллі.

Позитивний вплив на ґрунт мають органічні добрива, які мінімізують шкідливий вплив та стабілізують або ж навіть підвищують вміст гумусу (*Кузнєцова, 1992; Хомич & Голій, 2012; Черно & Рассадіна, 2019; Крутякова та ін., 2022*). Особливу цінність з-поміж різних органічних добрив

мають добрива, що виготовлені на основі органічного сапропелю. Ці добрива можна доповнювати альтернативними корисними копалинами, зокрема, калійною сіллю, фосфоритами, сіркою, апатитами тощо. Збалансовані за хімічним складом добрива можна вважати природними і перспективними.

За результатами оцінювання експертами (*Шевчук, 1996; Булік, 2005; Дем'янюк та ін., 2022*), кількість органічних сапропелів, що знаходяться у родовищах України, становить понад 0,15 млрд т у перерахунку на вологість 60%. Поклади у родовищах збільшуються внаслідок процесу евтрофікації. Території, де розташовані родовища, – це, переважно, болотисті регіони України, зокрема, Західне Полісся. Також значна кількість покладів, але, переважно, низькоорганічних та мулистих накопичень (*Крутякова та ін., 2022; Tsiz et al., 2023*), знаходиться у кожному прісноводному об'єкті (річка, ставок, сховище тощо) України.

У наукових джерелах міститься різна інформація щодо походження сапропелю та відсоткового вмісту органічної речовини у ньому (*Шевчук, 1996; Булік, 2005; Хомич & Цизь, 2013*). В окремих джерелах зазначено, що поклади накопичуються століттями та формуються на дні глибоководних водойм, як солоних, так і прісноводних, однак не зазначається їх органічний вміст. В інших джерелах пропонується називати прісноводні поклади органічними лише у випадку, коли у їх складі міститься понад 15% органічних речовин. Деякі науковці органічними називають будь-які прісноводні накопичення з вмістом органіки понад 30%. Органічні сапропелі для використання у сільському господарстві як добрива доцільно вибирати з найбільшим вмістом органічної речовини (понад 50%).

Поклади мінеральних речовин, що можуть доповнювати основний компонент (органічний сапропель) альтернативних добрив, також зосереджені в Україні (*Білецький, 2004*), зокрема: калійну сіль можна отримати з родовищ Дніпровсько-Донецької западини та Передкарпатського крайового прогину з запасом 4,3 млрд т; сірку – з родовищ Передкарпаття (0,4 млн т); фосфорити – з родовищ у межах Волинсько-Подільської плити, Криму, Закарпаття, Дніпровсько-Донецької западини (0,5 млн т); руди, що містять апатити, – з родовищ Торчинське,

Новополтавське, Стремигородське та інші (3,3 млрд т). Оскільки Україна має всі необхідні речовини для створення природних добрив, то є доцільність розроблення нової техніки та запровадження нових технологій виробництва таких добрив.

Ураховуючи відомі види добрив з сапропелю, інновації у технології виробництва цих добрив мають передбачати виготовлення гранульованої продукції. Гранули таких добрив повинні мати кулькоподібну форму, що дозволить їх вносити у ґрунт традиційними машинами для внесення гранульованих добрив та забезпечувати виконання вимог до робочого процесу машин для внесення гранульованих добрив.

Зважаючи на конструктивні особливості таких машин і характеристики інших видів гранульованих добрив, необхідно виготовляти гранули сапропелевих добрив з еквівалентним діаметром 3–6 мм, твердістю не більше 3 МПа та вологістю не менше ніж 35%.

Створені з природних компонентів органо-мінеральні добрива будуть чинити позитивний вплив на процес відновлення продуктивності ґрунту та його збагачення. Зокрема, органічна складова сприятиме збільшенню мікрофлори, спричинить поповнення запасу дефіцитних біогенних природних елементів, забезпечить збільшення поживних речовин та сполук (на молекулярному рівні), створить баланс вітамінування та ферментування, забезпечить формування сприятливої структури і водно-повітряного режиму, а також сприятиме знищенню шкідливих мікроорганізмів та стабілізуватиме кислотність ґрунту. Водночас, додані у добрива мінеральні компоненти природних корисних копалин забезпечать здоровий та якісний розвиток рослин під час вирощування в агрономічно обґрунтованій сівозміні. Отже, використання збагачених добрив з органічного сапропелю зупинить деградацію орного шару ґрунту та започаткує відновлювальний процес, який стимулюватиме гумусоутворення без відпочинку ріллі, тобто простоювання під паром.

Позитивний вплив органічного сапропелю на систему землеробства відомий (Шевчук, 1996; Бомба, 2001; Єрмоленко, 2002; Білецький, 2004; Дідух та ін., 2009; Хомич & Голій, 2012; Хомич & Цизь, 2013), однак використання сапропелевих добрив (компости, гумати, біодобрива, стимулятори росту, сипкі

органо-мінеральні добрива, органо-мінеральні суміші тощо) (Шевчук, 1996; Krutyakova et al., 2021; Tsz et al., 2023) непоширене. Це можна пояснити відсутністю єдиної стандартизованої технології їх виробництва, дороговартісними та енергозатратними процесами отримання сировини з підводних родовищ, відсутністю спеціалізованого обладнання, машин та засобів виробництва.

Отже тематика виробництва сапропелевих добрив дуже актуальна з-поміж науковців, однак результати досліджень, як правило, не впроваджені у виробництво й залишаються на стадії розробок. Тому основна задача дослідження зосереджена на синтезі наукового матеріалу та напрацюванні пропозицій щодо розроблення альтернативної технології виробництва гранульованих сапропелевих добрив, збагачених мінеральними речовинами, а також розробленні для неї обладнання.

Аналіз технічних рішень показав, що є низка запропонованих конструкцій машин для виробництва сапропелевих гранульованих добрив (відцентрові, барабанні, гідростатичні, вихрові, обертові, прес-екструдери, стрічкові гранулятори тощо) (Техноімпорт, н.д.; Дідух та ін., 2001; Цизь та ін., 2005; Хомич та ін., 2021). Робочий процес цих машин не передбачає підготовки сировини, а лише гранулювання з попередньо підготовленої маси, що отримана іншою машиною.

Отже, важливим є обґрунтування процесу підготовки сировини для гранульованих добрив. Виробниками техніки розроблені машини (Техноімпорт, н.д.; Рубан та ін., 2015), які призначені для підготовки різної сировини, з якої виготовляють гранульований продукт. Також у дослідженнях обґрунтовані фізико-механічні властивості гранул, що утворені у лабораторних умовах без уточнення конструкцій машин, за допомогою яких це було зроблено (Тихонов & Богдан, 2015; Gageanu et al., 2016; Jotautiene et al., 2021).

Гранулятори використовують у різних галузях промисловості, але найбільше у фармацевтичній галузі (Рубан та ін., 2015; Тихонов & Богдан, 2015; Vincevica-Gaile et al., 2019) для виготовлення таблеток чи лікарських капсул з медичними порошками. Також їх використовують у харчовій промисловості, наприклад, для виготовлення розчинної гранульованої кави та какао, ароматизаторів, сухого молока, приправ, цукерок та інших

харчових сипких сумішей. Гранулятори також використовують для гранулювання полімерної сировини, яку широко використовують для виготовлення плівок, пляшок, тари тощо. Також гранулятори використовують і в інших галузях, зокрема, виробництві добрив, барвників, пестицидів, кормів для тварин й птиці тощо.

Аналіз галузей виробництва різних продуктів у формі гранул та процесів їх утворення показав, що досить часто під час виготовлення гранульованого продукту використовують вологий матеріал, який або попередньо підсушують, або сушать під час гранулювання, або ж після гранулювання сушать продукт. Іноді реалізують роздільний спосіб виготовлення гранульованих продуктів з окремими процесами сушіння та формування гранул.

У тваринницькій галузі поширеними є гранульовані комбікорми (*Хомик та ін., 2022*). Процес їх виготовлення досить складний. Щоб отримати гранульований дрібнофракційний комбінований корм для молодняку свиней, необхідно попередньо подрібнити його компоненти, розпарити, охолодити (нагріти), а після цього сформувати та висушити чи зневоднити для тривалого зберігання. Такі процеси, як правило, розділяють на окремі операції та використовують окремі машини для їх реалізації. Для виготовлення гранульованих комбікормів використовують кілька окремих машин, зокрема, подрібнювач, гранулятор та сушарку. Використання кількох машин для вироблення готового продукту є недоліком технологічного процесу, оскільки це спричиняє необхідність використання транспортуючих елементів, що робить виробництво більш енергозатратним.

Швидко та якісно виготовити гранули з сировини можна за допомогою комбінованих сушарок-грануляторів. Інтенсифікувати процес грануляції можна шляхом використання обладнання, в якому гранулювання проходить з одночасним сушінням у «киплячому шарі». Гранулятор-сушарку також використовують для перетворення порошкових сумішей чи рідких та пастоподібних матеріалів у гранули круглої чи продовгуватої форми. Однак це обладнання можна використовувати для оброблення сировини, що може піддаватися впливу високих температур. Таке обладнання не можна використовувати для роботи з

сапропеле-мінеральною сумішшю, оскільки технології виробництва суттєво відрізняються, а температура формування гранули значно перевищує 100°C. Однак комплексний підхід (одна машина виконує кілька операцій) доцільно використати під час розроблення нових машин для виробництва гранульованих добрив.

Отже, необхідно прагнути до створення машини, яка має працювати з вологим пастоподібним матеріалом та в процесі утворення гранул підсушувати цей матеріал. Конструкція нової машини має виконувати основні процеси (змішування компонентів, їх подрібнення, сушіння, а також вентиляцію і гранулювання) та додаткові (сепарування, фасування), а також бути простою й зручною в обслуговуванні. Також доцільно прагнути до одночасного виконання кількох основних процесів, наприклад, подрібнення та сушіння, вентиляції та гранулювання. Це дозволить значно скоротити тривалість технологічного процесу.

Проаналізуємо конструкції машин для виробництва різних гранульованих продуктів. Перший процес виробництва – це змішування сировини. Розроблені шнекові, лопатеві, стрічкові, гвинтові, турбінно-барабанні, пропелерні та інші робочі органи змішувачів. Саме такі найпростіші конструкції дають повне уявлення про процеси, що відбуваються за змішування певних компонентів. Деякі конструкції змішувачів можуть одночасно подрібнювати сировину та транспортувати або ж проводити термічне оброблення. Отже, особливості перебігу процесу змішування суттєво залежать від властивостей сировини, яка обробляється.

Після утворення суміші її подрібнюють. Це найбільш поширена операція, під час якої сировину підготовлюють до використання. Після подрібнення утворюються частинки сировини необхідного розміру. Досить часто процес подрібнення компонується з іншими процесами, наприклад, подрібнення-сушіння, подрібнення-змішування тощо. Більшість конструкцій подрібнювачів створені для твердих матеріалів, оскільки ці матеріали найпростіше подрібнюються. Як правило, у таких машинах встановлені ріжучі леза та протирізальна пластина або ж обертові ножі. Використовувати такі машини для в'язких матеріалів є недоцільним, оскільки буде

відбуватися налипання матеріалу на ножі, а також буде ускладнене його відривання від загальної маси. Матеріали можна також подрібнити за допомогою вібрації, рикошету, биття, тертя, стиснення, ударної дії, вибухів тощо (*Рубан та ін., 2015*). Подрібнення в'язкого матеріалу з використанням таких способів неможливе. Тому науковці в якості альтернативного способу для подрібнення пропонують використовувати продавлювання матеріалу через отвори за допомогою нагнітальних шнекових пристроїв чи інших робочих органів, які працюють за принципом витискування або пресування.

Третій технологічний процес, який об'єднує дві операції, – це сушіння та вентилявання. У сільському господарстві для таких процесів використовують напільні та барабанні сушарки. Недоліками таких машини є: низький рівень механізації завантаження і вивантаження; нерівномірність сушіння за об'ємом камери. У випадку виробництва гранульованих добрив доцільно проводити контактне та конвективне сушіння, причому за температури до 100°C. Контактне сушіння частинок з в'язкого матеріалу унеможливить їх злипання, а конвективне – пришвидшить відведення вологи.

Наступною операцією технологічного процесу є гранулювання. Для гранулювання матеріалу шляхом кочення використовують спосіб тертя гладкими стінками циліндра. Робота такого гранулятора описана у (*Цизь та ін., 2005*). Суміш сировини, що обробляється, перетворюється на гранули внаслідок кочення. Також для гранулювання порошкоподібного матеріалу використовують тарілчасті (чашкові, дискові) гранулятори. Вони, як правило, містять диск, що обертається навколо власної осі з регульованим кутом нахилу до вертикалі. Очищення від налиплого матеріалу проводять скребками.

Останній етап виробництва гранул може завершуватись їх сепаруванням та фасуванням. Розроблено низку конструктивних рішень для цих технологічних операцій.

Отже, за результатами проведеного огляду стає зрозуміло, що практика використання проаналізованих машин для роботи з в'язким матеріалом є частково доцільною. Машини для змішування можна використовувати для утворення суміші з різної органічно-мінеральної сировини (ОМС) лише за умови обґрунтування

параметрів процесу. Фракційність отриманих гранул буде залежати від подрібнення сировини, а швидкість сушіння від подачі матеріалу та швидкості його переміщення. Використання сушарок барабанного типу, як конструктивного елементу для сушіння гранул, є можливим у випадку встановлення спеціальних насадок та обґрунтування режиму процесу. Інтенсифікувати процес сушіння можна розташувавши подрібнювальний механізм у барабані сушарки, що реалізує спосіб видавлювання або витискування маси через отвори. Отримані гранули повинні мати еквівалентний діаметром 3–6 мм. Якість продукту буде залежати від вмісту органічно-мінеральної складової, вологості і температури формування.

**Мета дослідження** – дослідження процесу виробництва гранульованих добрив на основі сапропелю у розробленій машині.

#### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Оскільки виробництво гранульованих сапропелевих добрив передбачає процеси підготовки сапропелевої сировини, дозування та змішування компонентів, подрібнення, сушіння, сепарування та фасування, відповідно, у лабораторних умовах поетапно проводили дослідження окремо кожного з цих процесів та обґрунтовували їх доцільність.

Сапропелеву сировину брали з родовища (озеро Бурків) та визначали її властивості. Первинне підготування відбувалося шляхом пневматичного добування середнього шару сапропелю та природного зневоднення у геотубах. Обладнання та експериментальні установки вибирали з існуючих стандартних моделей та власних розробок.

Природна вологість добутого сапропелю становила 94%, а загальний вміст органіки 81%. Вологість сапропелю після природного відлежування у геотубі протягом 30 днів становила 79,1%. Методики за якими проводили дослідження представлені у працях (*Булік, 2005; Хомич & Цизь, 2013*). Для досліджень у лопатовому змішувачі протягом 25 хв утворювали багатокомпонентну суміш (**рис. 1, а**) з додаванням до сапропелевої сировини порошкоподібних мінеральних корисних копалин (фосфориту та калійної солі) з вологістю 15% у співвідношенні 10:1.



Подрібнення новоутвореної сировини проводили у перфорованому циліндрі шляхом продавлювання роликком (рис. 1, б). Діаметр отвору становив 6 мм, 8 мм та 10 мм, а товщина перфорованого циліндра 0,15 мм, 0,3 мм та 0,55 мм. Отримані частинки мали різні параметри (рис. 1, в), що залежали від товщини шару суміші у перфорованому циліндрі. Утворені циліндричні частинки поміщали на нагріту до температури 100°C плоску коливну поверхню з керамічним покриттям та сушили упродовж 20 хв, 25 хв, 30 хв, 35 хв або 40 хв (рис. 2).

Для кожного з отриманих зразків гранул проводили визначення вологості методом сушіння за стандартизованою методикою. Також за стандартизованими методиками проводили визначення фракційного складу, об'ємної та одиничної щільності гранул.

Для дослідження міцності на стиск гранул була запропонована установка (рис. 3), за основу якої взято екстензометр з плоскою пружиною жорсткістю 25 Н/мм. Для автоматизованого фіксування прикладеного до

гранули зусилля прилад було обладнано цифровим індикатором переміщення, який дозволяє фіксувати значення прогину пружини у електронній таблиці Microsoft Excel у режимі реального часу.

Зразки гранул добрив розташовували між рухомими поверхнями рамки. Далі плавно прикладали навантаження шляхом обертання рукоятки та спостерігали за процесом. Збільшення навантаження припиняли, коли покази індикатора переміщення мали від'ємний приріст. Зусиллям руйнування вважалось максимальне значення, зафіксоване в електронній таблиці. Міцність гранули добрив розраховували через еквівалентну площу її перерізу.

Далі для кожного з отриманих зразків було проведено визначення статичної міцності гранул, одиничної та об'ємної щільності, а також фракційного складу. Дослідження міцності гранул добрив та фракційного складу проводили з трикратною повторюваністю, а дослідження одиничної та об'ємної щільності гранул – з десятикратною.

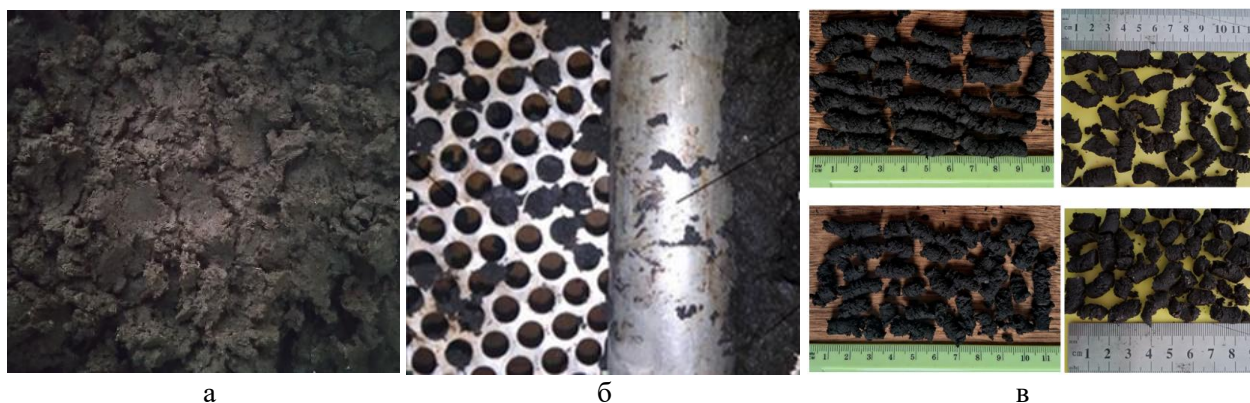


Рис. 1 – Проведення дослідження:

а – багатокомпонентна суміш; б – процес подрібнення; в – утворені частинки добрив



Рис. 2 – Дослідження процесу сушіння частинок суміші на контактній керамічній поверхні:

а – початковий вигляд частинок; б – отримані гранули



**Рис. 3** – Установки для дослідження міцності гранул добрив:  
1 – індикатор переміщення; 2 – рамки; 3 – гранула; 4 – рукоятка

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

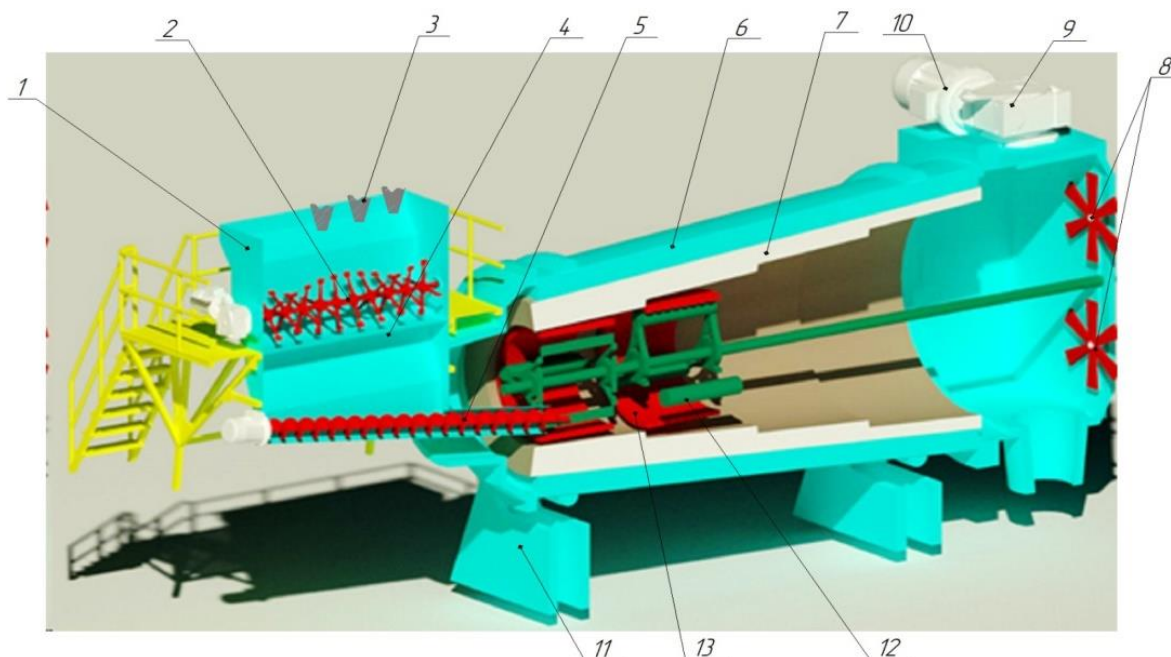
Сапропель з родовищ евтрофіюваних водних об'єктів (озер) має найбагатший склад мікроелементів і кількість органічних речовин, що перевищує 50%. Добрива з такого сапропелю забезпечуватимуть відновлення гумусу та підвищення родючості ґрунту. Під час добування сапропелевої сировини рекомендується лишати верхній шар покладів родовища нерухомим, а розробляти середній та нижній шари. Залежно від кількості органічної речовини у сапропелі пропонуємо таку класифікацію гранульованих добрив: «Premium» – 80% та більше; «Standard», 60–80%; «Normal» – не менше 50%. Додавання у сапропелєві добрива мінеральних компонентів потрібно проводити з урахуванням показників ґрунту та агрономічних рекомендацій.

Під час добування та підготовки сапропелевої сировини для виробництва добрив необхідно дотримуватись правил добування сапропелю природної вологості непорушної структури (Tsiz & Homich, 2013) та природного зневоднення, оскільки основним елементом живлення рослин є активні біологічні речовини – гумінові кислоти. За диспергованого добування з водою ці речовини вимиваються і розчиняються у воді, а за штучного зневоднення за температури

120°C (Хомич & Цизь, 2013) їх позитивна дія на розвиток рослин значно менша внаслідок того, що корисні мікроорганізми та мікроелементи вигоряють, залишивши за собою малопродуктивну золу і шлак. Для забезпечення сільськогосподарських рослин гуміновим комплексом необхідно проводити природне зневоднення добутого сапропелю та використовувати для цього провітрювання з підсушування сировини на сонці.

На основі аналізу машин для виробництва гранульованих продуктів пропонується схема машини, яка забезпечить необхідну для виробництва гранульованих сапропелевих добрив послідовність виконання операцій (рис. 4). Під час роботи машини порція органічної сировини спрямовується у верхню частину двосекційного приймального бункера змішувального пристрою. Туди ж через дозатори спрямовується і порошкоподібна мінеральна складова. За допомогою мішалок компоненти змішуються до однорідного стану, внаслідок чого утворюється суміш. У процесі змішування мінеральні компоненти частково зневоднюють сапропель, вбираючи вологу, та збагачують сапропель. Після змішування суміш з верхньої частини бункера потрапляє до нижньої частини через заслінку, звідки шнековим транспортером спрямовується у сушильну камеру.





**Рис. 4** – 3D модель машини для виробництва гранульованих добрив з органічного сапропелю:  
 1 – бункер; 2 – мішалка; 3 – дозатори; 4 – заслінка; 5 – шнековий транспортер; 6 – корпус барабана;  
 7 – сушильна поверхня з керамічним покриттям; 8 – вентилятори; 9 – редуктор;  
 10 – електродвигун; 11 – опори; 12 – котки; 13 – перфорований циліндр

Сушильна камера містить барабан та подрібнювач. Барабан містить корпус, який змонтовано на опорних стійках, каскадну насадку з контактною поверхнею, а також подрібнювальний механізм, що має привод, перфорований циліндр та котки (ролики). Головним приводом барабану та його механізмів є електродвигун та редуктор. Конвективне сушіння проходить внаслідок забезпечення вентиляторами циркуляції нагрітого повітря.

Під час роботи подрібнювального механізму котки продавлюють в'язку суміш через перфоровані отвори циліндра та вона опиняється на контактній сушильній поверхні, яка виготовлена з керамічного матеріалу. У такий спосіб подрібнені частинки суміші внаслідок обертання барабану переміщуються контактною поверхнею та просушуються. Залежно від вологості суміші, утворені частинки, які потрапляють на першу сушильну циліндричну контактну поверхню, можуть частково об'єднуватись одна з одною та утворювати суцільну масу. Це означає, що за один такий процес неможливо створити гранульовану частинку та висушити її до потрібної вологості. Тому у конструкції передбачено ще один подрібнювач, до якого

надходить частково висушена маса суміші з об'єднаних частинок, та каскад контактної сушильної поверхні, де новоутворені частинки висушуються знову.

За вологості суміші менше ніж 70% повторне подрібнення непотрібне, оскільки об'єднання частинок не відбувається. Далі досушування частинок відбувається внаслідок контактного сушіння шляхом проковзування на каскадних поверхнях доки частинки не досягнуть вологості 40%. На останньому каскаді утворюються гранули, вони стають меншими в об'ємі та твердішими.

З останнього каскаду гранули добрив спрямовуються в охолоджувальну камеру з сепарувальним механізмом. Охолодження та розподілення гранул за фракційним складом проходить перед фасуванням продукту. Некондиційна фракція гранул повертається до бункера на повторне перероблення, а товарна – у тару та на склад. Нагрівання каскадної контактної поверхні машини проходить від електромережі.

У процесі сушіння на коливній поверхні протягом інтервалів часу, визначених методикою, циліндричні гранули набули кулястої форми та були отримані їх зразки з вологістю, що подана у таблиці.

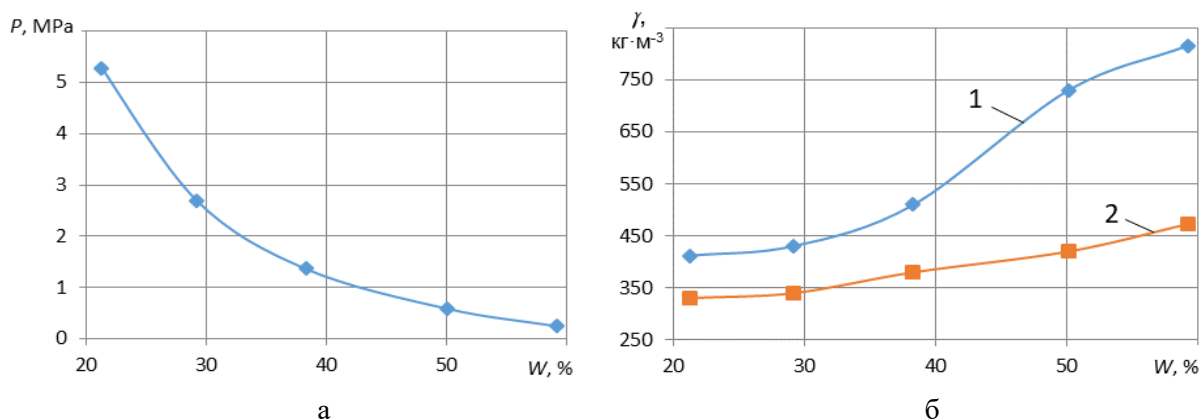
За результатами визначення статичної міцності та щільності гранул залежно від їх вологості побудовані графічні залежності, що подані на **рис. 5** та **б**.

Отримані результати показують, що за рахунок пластифікації органо-мінеральної суміші у процесі продавлювання крізь отвори перфорованої поверхні машини утворюються циліндричні частинки, які у процесі контактного сушіння на коливній поверхні набувають кулястої форми. За час сушіння в межах 30–35 хв вологість гранул досягала значень 30–40%. При цьому статична міцність

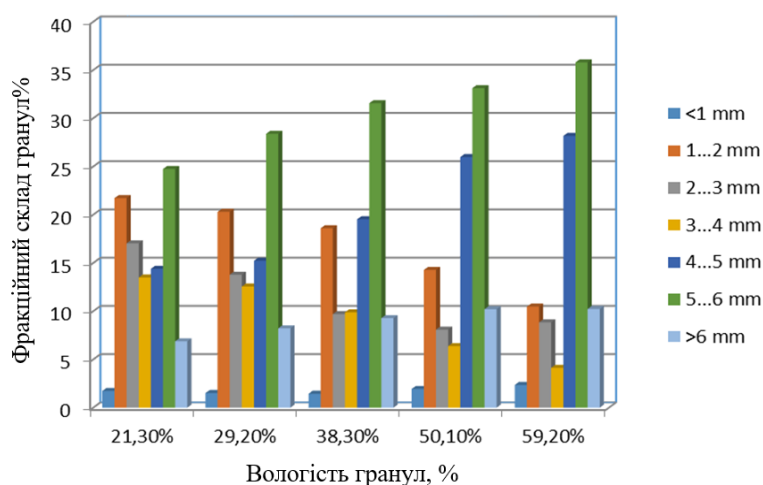
гранул знаходилася у межах від 1 до 2,5 МПа. Такої міцності гранул цілком достатньо для їх внесення існуючими машинами у ґрунт. Такий ефект досягався внаслідок інтенсивної усадки саме поверхневих шарів гранул через їх контакт з нагрітою поверхнею та внаслідок високих в'язучих властивостей сапропелевої сировини. На зовнішній поверхні гранул спостерігалися незначні нерівності та тріщини, утворені внаслідок обкочування, коливання та висихання. Ці дефекти не є небезпечними, оскільки сприяють прискоренню процесу розкладання гранул у ґрунті.

**Таблиця** – Вологість гранул добрив

Показник	Значення показника				
Тривалість сушіння, хв	20	25	30	35	40
Вологість гранул, %	59,2	50,1	38,3	29,2	21,3



**Рис. 5** – Графічні залежності зміни статичної міцності гранул добрив  $P$  (а) та щільності  $\gamma$  (б) від їх вологості  $W$  (1 – одинична щільність; 2 – об’ємна щільність)



**Рис. 6** – Вплив вологості гранул на їх фракційний склад

У діапазоні вологості 30–40% щільність одиничних гранул знаходилася у межах 450–550 кг/м<sup>3</sup>, а об'ємна щільність – у межах 350–450 кг/м<sup>3</sup>, що вказує на пористу структуру гранул добрив. Завдяки цьому створюються передумови до швидкого їх розкладання у ґрунті. Аналіз фракційного складу гранул вказує на наявність серед гранул вологістю 21,3 % та 29,2 % до 20% частинок з розмірами від 1 до 2 мм. За визначеної одиничної щільності це може суттєво зменшити ширину їх розкидання відцентровими апаратами під час внесення у ґрунт. Тому доцільно вносити такі гранули локально у рядки під час сівби або ж підживлення сільськогосподарських культур.

### ВИСНОВКИ

В Україні особливу перспективу мають добрива, що утворені на основі природного органічного сапропелю. Основний склад таких добрив необхідно доповнювати мінеральними компонентами з місцевих родовищ. Найвища ефективність добрив може бути забезпечена у випадку їх гранулювання.

Встановлено, що внаслідок пластифікації органо-мінеральної суміші під час процесу продавлювання крізь отвори перфорованої поверхні утворюються циліндричні частинки, які у процесі контактного сушіння на коливній поверхні набувають кулястої форми. За час сушіння у межах 30–35 хв можна досягти значення вологості гранул у межах 30–40 %. При цьому статична міцність гранул добрив буде у межах від 1 до 2,5 МПа.

Щільність отриманих одиничних гранул та їх об'ємна щільність вказує на їх пористу структуру, що сприятиме швидкому їх розкладанню у ґрунті. Проте наявність з-поміж гранул вологістю 21,3 % та 29,2 % до 20 % частинок з розмірами від 1 до 2 мм може суттєво вплинути на зменшення ширини їх розкидання відцентровими апаратами під час внесення у ґрунт. Тому доцільно вносити такі гранули локально у рядки під час сівби або підживлення.

Запропонований спосіб отримання органо-мінеральних добрив є перспективним, але вимагає подальших досліджень з використання у складі гранул різних видів мінеральних компонентів з місцевих родовищ, а також механізму впливу цих добрив на урожайність

сільськогосподарських культур та властивості ґрунту.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Flint, A. L., & Flint, L. E. (2002). Particle density. In J. H. Dane, G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods* (pp. 229-240). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c10>
- Gageanu, I., Voicu, G., Bunduchi, G., & Bracacescu, C. (2016). Experimental research on the process of pelleting salix viminalis depending on humidity and granulation. In *Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia* (pp. 624-628).
- Jotautiene, E., Mioldazys, R., Gaudutis, A., & Aboltins, A. (2021). Granulation of poultry manure and biochar for production of organic fertilizers. In *Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia* (pp. 431-436). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF091>
- Krutyakova, V., Pylyak, N., Nikipelova, O., Bulgakov, V., Rucins, A., & Beloev, H. (2021). Research on the technology of obtaining biofertilizers based on sewage sludge. In *Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia* (pp. 1080-1087). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF234>
- Tsiz, I., & Homich, S. (2013). Experimental research of working process of pneumatic intake device for sapropel extraction. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 40(2), 67-72.
- Tsiz, I., Khomych, S., Didukh, V., & Yuhymchuk, S. (2023). Study of dehydration of organic sapropel by compression method. In *Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia* (pp. 173-178). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF033>
- Vincevica-Gaile, Z., Stankevica, K., Irtiseva, K., Shishkin, A., Obuka, V., Celma, S., Ozolins, J., & Klavins, M. (2019). Granulation of fly ash and biochar with organic lake sediments – A way to sustainable utilization of waste from bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, 125, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.004>
- Балюк, С. А., Медведєв, В. В., Воротинцева, Л. І., & Шимель, В. В. (2017). Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня (*Modern problems of soil degradation and measures to achieve a neutral soil level*). *Вісник аграрної науки*, 95(8), 5-11. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01>
- Білецький, В. С. (2004). *Мала гірнича енциклопедія (Small mining encyclopedia)*. Донецьк: Донбас.
- Бомба, М. Я. (2001). Проблеми родючості ґрунтів: стан і перспективи відновлення у XXI столітті (*Problems of soil fertility: state and prospects of recovery in the 21st century*). *Сільський господар*, 9-10, 20-23.
- Булїк, Ю. В. (2005). *Обґрунтування процесу і параметрів механізму для добування сапропелю*

- (Justification of the process and parameters of the mechanism for extracting sapropel) [Дис. канд. техн. наук]. Луцький державний технічний університет, Луцьк.
- Дем'янюк, О. С., Коніщук, В. В., Мусич, О. Г., Симочко, Л. Ю., & Мостов'як, І. І. (2022). Аналіз запасів сапропелю в Україні як альтернативної сировини органічних добрив (*Analysis of sapropel reserves in Ukraine as an alternative raw material for organic fertilizers*). *Збалансоване природокористування*, 2, 73-84. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2022.261252>
- Дідух, В. Ф., Бабарика, С. Ф., Заїкін, М. М., & Гевко, І. Б. (2009). Результати експериментальних досліджень технологічного процесу поверхневого внесення сапропелів в ґрунт (*Results of experimental studies of the technological process of surface introduction of sapropels into the soil*). *Вісник ХНТУСГ імені П. Василенка*, 78, 76-78.
- Дідух, В. Ф., Кужель, Е. В., Шум, Г. А., & Шум, М. А. (2001). Гранулятор (*Granulator*). Патент України 982. Київ: Державний департамент інтелектуальної власності.
- Єрмоленко, В. О. (2002). Біологічно активні добрива (*Biologically active fertilizers*). К.: НВЦ СТ «Вибір».
- Закон України. (2018). Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції (*About the basic principles and requirements for organic production, circulation and labeling of organic products*) (від 10 липня 2018 р., № 2496-VIII).
- Крутякова, В. І., Пиляк, Н. В., & Нікіпелова, О. М. (2022). Оптимізована технологія отримання біодобрив на основі осадів стічних вод. *Вісник аграрної науки*, 1(826), 50-56. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202201-07>
- Кузнєцова, Т. О. (1992). Вдосконалення технології внесення сапропелю з метою підвищення родючості ґрунтів в умовах Західного Полісся України (*Improvement of sapropel introduction technology in order to increase soil fertility in the conditions of the Western Polissia of Ukraine*) [Дис. канд. техн. наук]. УПВГ, Рівне.
- Мольчак, Я. О., Мельничук, М. М., Андрощук, І. В., & Заремба, В. М. (1998). Деградація ґрунтів та шляхи підвищення їх родючості (*Degradation of soils and ways of increasing their fertility*). Луцьк: Настир'я.
- Рубан, О. А. та ін. (2015). *Сучасні фармацевтичні технології (Modern pharmaceutical technologies)*. Харків: Вид-во НФаУ.
- Техноімпорт. (н.д.). *Гранулятори і екструзійне обладнання (Granulators and extrusion equipment)*. Retrieved May 15, 2024, from [https://technoimport.uaprom.net/ua/g6175892-granulatory-ekstruzionnoe-oborudovanie/page\\_2](https://technoimport.uaprom.net/ua/g6175892-granulatory-ekstruzionnoe-oborudovanie/page_2)
- Тихонов, О. І., & Богдан, Н. С. (2015). Технологія виготовлення гранул для місцевого лікування виразки шлунку та дванадцятипалої кишки (*Production technology of granules for local treatment of gastric and duodenal ulcers*). В *Інформаційний лист про нововведення в системі охорони здоров'я. Випуск 8 з проблеми «Фармація»*, 124. К.: Укрмедпатентінформ.
- Хомик, Н. І., Ткаченко, І. Г., & Довбуш, А. Д. (2022). *Машина та обладнання для тваринництва (Machinery and equipment for animal husbandry)*. Тернопіль: ФОП Паляниця ВА.
- Хомич, С. М., & Голій, О. В. (2012). Аналіз механізму впливу сапропелю на родючість ґрунтів (*Analysis of the mechanism of sapropel influence on soil fertility*). *Сільськогосподарські машини*, 22, 229-236.
- Хомич, С. М., & Цизь, І. Є. (2013). Дослідження фізичних властивостей сапропелю (*Study of the physical properties of sapropel*). *Сільськогосподарські машини*, 26, 124-134.
- Хомич, С. М., Цизь, І. Є., Сацюк, В. В., & Павлік, В. А. (2021). Удосконалення технології виробництва сапропелєвих добрив. *Сільськогосподарські машини*, 46, 104-110. <https://doi.org/10.36910/acm.vi46.497>
- Цизь, І. Є., Дідух, В. Ф., Величко, В. Л., & Грабовець, В. В. (2005). Барабанна сушарка-гранулятор (*Drum dryer-granulator*). Патент України 7797. Київ: Державний департамент інтелектуальної власності.
- Черно, О. Д., & Рассадіна, І. Ю. (2019). Методичні поради до виконання практичних завдань з курсу «Система застосування добрив» студентами спеціальності 201 «Агрономія» (*Methodical advice for the performance of practical tasks from the course «Fertilizer application system» by students of specialty 201 «Agronomy»*). Умань: Уманський національний університет садівництва.
- Шевчук, М. Й. (1996). *Сапропелі України: запаси, якість та перспективи використання (Sapropel of Ukraine: reserves, quality and prospects of use)*. Луцьк: Надстир'я.