

УДК 621.365:532.135:66.011:66.047-035.2

DOI: 10.15673/swonaft.v88i2.3043

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ РЕОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ

Кравченко О.Ю., аспірант

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Copyright © 2024 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under Vthe Creative Commons Attribution International License (CC By).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Анотація. Виявлено ключові проблеми при зневодненні харчової сировини реологічної структури. Представлено аналіз літературних джерел, присвячених вирішенню проблематики зневоднення матеріалу з неньютонівськими властивостями. Найбільш розповсюдженим методом видалення вологи з реологічної сировини є розпилювальне сушіння. Проте незважаючи на ефективність установок даного типу, їх робота супроводжується суттєвими енерго- та ресурсовтратами з відпрацьованим теплоносієм. Окремою проблемою є високі температури обробки, що вкрай негативно впливає на якість готового продукту. Зазначено, що наявність великої кількості робіт вказує на актуальність даного напрямку і потребує інноваційного підходу при організації процесів дегідратації неньютонівських рідин. При конструюванні варто керуватися не лише принципами енерго- та ресурсоефективності, а й можливістю організації процесу сушіння в режимі безперервної роботи. Відповідно до цього було запропоновано конструкцію стрічкової сушильної установки з інфрачервоними джерелами енергії. ІЧ випромінювачі здатні проникати вглиб матеріалу в межах 2-4 мм. Тому, з метою забезпечення ефективності та якості процесу сушіння, товщина шару харчової сировини не повинна перевищувати зазначеного регламенту. В залежності від заданого значення вологовмісту готового продукту в установці передбачено регулювання швидкості руху стрічкового транспортера та потужності електромагнітного поля ІЧ діапазону. Передбачено завантаження початкової сировини як на спеціальних касетах, так і безпосередньо на стрічку транспортера. При цьому встановлюється спеціальний бункер подачі сировини, а необхідна товщина шару забезпечується за допомогою регулятора. Запропонована конструкція стрічкової сушарки з ІЧ генераторами відзначається працездатністю та високою надійністю, що підтверджується результатами експериментальних досліджень. Разом із цим вона представляє комерційний інтерес при впровадженні у виробництво за рахунок наявності безперервного режиму роботи.

Ключові слова: рослинна сировина, реологічна структура, неньютонівські рідини, сушіння, зневоднення, дегідратація, інфрачервоне поле.

Вступ

Процеси сушіння реологічної сировини супроводжуються великими складнощами, пов'язаними з особливими властивостями такої структури. Великі значення динамічного коефіцієнту в'язкості, утворення приграничного шару і, як наслідок, підвищення температури продукту та збільшення часу процесу суттєво знижують ефективність класичних методів сушіння, найбільш популярними серед яких виступають конвективний та розпилювальний. Для досягнення необхідного значення вологовмісту збільшують швидкість та температуру сушильного агента, однак це призводить до зростання теплових втрат і ККД процесу знижується. В умовах теперішнього енергодефіциту, що зумовлює ріст цін на енергію, такий підхід до вирішення проблеми сушіння є навіть неприйнятним через підвищення собівартості готового продукту і зниження його конкурентоспроможності. Дана проблематика потребує інноваційних шляхів вирішення, які полягають в зміні організації процесу, використання нових джерел енергії.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

Проблематикою сушіння реологічної сировини активно займаються і отримані результати дійсно вказують на те, що поліпшення даного процесу з точки зору ресурсо- та енергоефективності цілком можливе.

Наприклад, у 2019 році вченими Цзяннаньського та Квінслендського університетів (Китай) були проведені дослідження з висушування китайського ямсу (батату) до порошкоподібного стану [1]. В якості порівняння було проведено зневоднення різними методами, а саме: мікрохвильовим у вакуумі, конвективним та сублімацією. В результаті було відмічено, що найкращий результат за якісними показниками був отриманий при мікрохвильовому сушінні.

У 2022 році в Цзяннаньському університеті (Китай) був проведений порівняльний аналіз структурних, реологічних та органолептичних властивостей свіжого супу зі сніжного гриба (*Tremella fuciformis*) та відновленого швидкорозчинного супу, попередньо отриманого шляхом висушування конвективним, інфрачервоним (ІЧ) та сублімаційним методами [2]. Кожен з них чинить певні позитивні та негативні впливи на сировину, тому в залежності від поставленого завдання всі ці методи мають право на існування.

У цьому ж році в Університеті Газіантепу (Турція) досліджувався процес зневоднення тертої картоплі в умовах комбінованої дії конвективного сушіння та радіочастот [3]. В результаті такого компонування суттєво скоротився час процесу: на 58% та 70% у порівнянні з окремим конвективним та радіочастотним методами відповідно.

У 2018 році на базі Федерального університету Лаври (Бразилія) були отримані гідроколоїдні порошки з пейрескії колочкуватої (*Pereskia aculeata*) послідовним висушуванням у вакуумній камері та сублімацією [4]. Температура теплової обробки сягала 60°C, проте тривалість процесу становила 24 години. Сублімація протікала за температури -40°C та при тиску 0,1 кПа на протязі 24 годин.

У 2017 році в Університеті Папалопан та Національному політехнічному інституті (Мексика) досліджувався процес зневоднення слизу опунції індійської (*Opuntia ficus-indica*) у розпилювальній сушарці, що в подальшому використовувався для збереження антоціанів баклажану, а також застосовувався в якості екологічно чистого екстрагенту [5]. Оскільки слиз має властивості неньютонівської рідини, процес сушіння яких є досить складним, то для надання йому властивостей неньютонівської рідини було забезпечено взаємодію з 0,4%-оцтовою кислотою.

Вченими Національного науково-дослідного інституту молочної промисловості (Індія) у 2021 році були проведені досліді з покращення процесу сушіння порошку молозива, збагаченого імуноглобуліном, базуючись на реологічному аналізі [6]. Температура сушильного агенту в розпилювальній сушарці варіювалась в межах 150–180°C, витрати молозива становили 20–70 мл/хв.

У період з 2019 по 2021 рік вченими Вагенінгенського університету (Нідерланди) була досліджена реологічна поведінка концентрованих мальтодекстринів при крапельному сушінні [7, 8]. В результаті була отримана модель ефективної дифузії в процесі сушіння для сировини реологічної структури, що дозволяє прогнозувати поведінку неньютонівських рідин при зневодненні.

У 2020 році в Кувейтському інституті наукових досліджень (Кувейт) вивчалися процеси зневоднення пюре зелених бананів в конвективній та сублімаційній сушарках [9]. При сублімації ключові параметри процесу мали наступні значення: тиск – 0,7 Па, температура – -80°C, тривалість сушіння – 36 годин. Конвективне сушіння проводилося на протязі 15 годин за температури 50-60°C та швидкості сушильного агенту 2,9 м/с.

У 2024 році спільними зусиллями науковців Університетів Яунде I та Дшанг (Камерун) було проведено висушування африканської сливи (сафу), яка після збору врожаю стає досить м'якою і набуває властивостей неньютонівської сировини, що ускладнює процес її зневоднення [10]. Сушіння проводилося в духовій шафі з вимушеною конвекцією, де африканська слива у пастоподібній формі розміщувалася на спеціальних полицях. Через складність структури сировини тривалість процесу сягала 40 годин за температури близько 42°C.

В результаті літературного огляду результатів досліджень наукової спільноти щодо проблематики процесів дегідратації реологічної сировини було виявлено безліч варіацій організації цих процесів, які здебільшого відрізняються характером підведення енергії. В зв'язку зі складною неньютонівською структурою всі вони по різному справлялися з поставленим завданням, однак бажаний результат завжди був досягнений. Більшість робіт характеризуються значною довготривалістю, хоча температурні режими були в межах регламенту, особливо відносно термолабільної сировини. В умовах виробництва час протікання процесів є досить важливим критерієм ефективності, тому зневоднення харчової сировини реологічної структури має бути значно прискореним. Знову ж таки, вплинути на це можна за рахунок правильного підбору джерела енергії, який би дозволив при правильних режимах досягти заданого значення кінцевого вологовмісту за мінімальних енерговитрат.

Відповідно до цього пропонується використання електромагнітних полів інфрачервоного діапазону. Проникна здатність ІЧ хвиль є досить малою і сягає близько 2-4 мм в залежності від типу та структури сировини. Однак дана особливість не завдає ніяких перешкод, оскільки цілком можливо забезпечити товщину шару матеріалу, що висушується, в даних межах.

Конструювання інноваційної установки для зневоднення реологічної сировини

Однією з головних вимог, що повинна бути реалізована в ході конструювання установки, є можливість роботи у безперервному режимі. Дана перевага є важливим параметром при впровадженні будь-яких розробок у виробництво. В результаті, на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту Одеського національного технологічного університету на чолі з професором Бурдо О.Г. було запропоновано апарат стрічкового типу, що є досить простим у реалізації та надійним при експлуатаванні. Пілотний зразок установки включав в себе наступні головні елементи (рис. 1): зону завантаження початкової сировини, зону вивантаження готового продукту, зони видалення вологого повітря (1), модулі генерації інфрачервоного випромінювання (2), блоки керування ІЧ генераторами (3) та кроковий двигун.

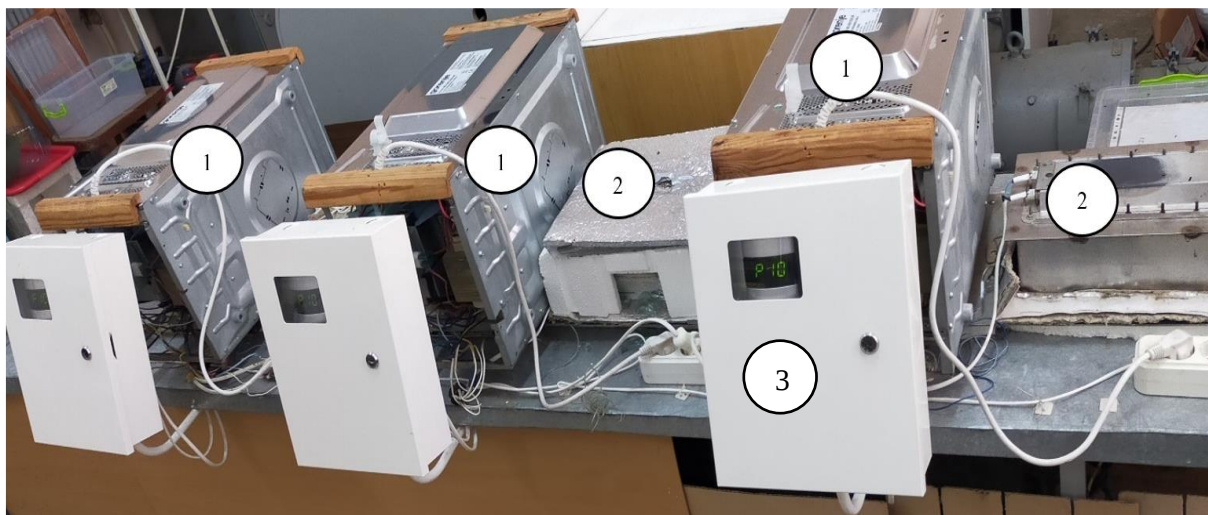


Рис. 1 – Електродинамічний стрічковий апарат для зневоднення неньютонівських рідин.

З метою унеможливлення контакту оператора установки та іншого обслуговуючого персоналу з внутрішніми елементами установки передбачений захисний кожух із заземленням.

Модуль генерації інфрачервоного випромінювання (рис. 2) являє собою ІЧ генератор (4), що розташований в заземленому теплоізольованому корпусі (5). Сировина, що проходить через цей модуль, зазнає впливу ІЧ поля через спеціальний отвір всередині модуля. В результаті цього, волога, що знаходиться всередині матеріалу, вивільняється на поверхню та видаляється з неї разом з повітрям через зону видалення вологого повітря, що в свою чергу оснащений вентилятором.

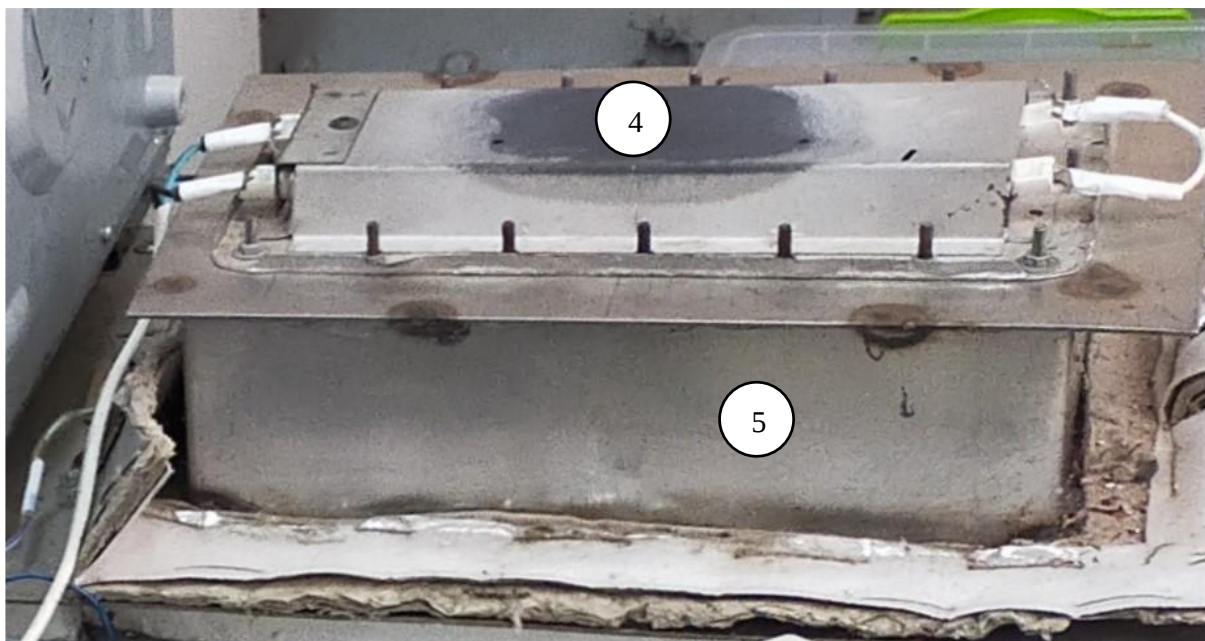


Рис. 2 – Модуль генерації інфрачервоного випромінювання.

Надходження сировини до установки здійснюється через спеціальну зону завантаження (рис. 3). Головною ідеєю цієї зони є унеможливлення дисипації теплової енергії в навколишнє середовище, що дозволяє забезпечити високу енергоефективність установки в цілому. Завантаження сировини організовується за рахунок її розміщення на касетах, які подаються на стрічку транспортера.



Рис. 3 – Зона завантаження початкової сировини.

Подача сировини може здійснюватися не лише на касетах, а й рівномірно розподілятися безпосередньо на стрічку транспортера. Для цього на вході встановлюється спеціальний бункер подачі сировини. Регулювання товщини шару продукту на стрічці здійснюється за допомогою регулятора 6.

В залежності від типу та початкового вологовмісту сировини, а також від заданого кінцевого значення вологовмісту, в установці передбачено регулювання потужністю ІЧ випромінювачів (блоки 3) та швидкістю руху стрічкового конвеєра завдяки кроковому двигуну.

Експериментальні дослідження, проведені на даній стрічковій сушарці з ІЧ генераторами, вказують на працездатність та надійність розробленої конструкції [11]. Реалізація безперервного режиму роботи робить установку конкурентоспроможною при впровадженні у виробництво.

Висновки

Сушіння харчової сировини реологічної структури є досить складним в організації процесом. У світі активно займаються цією проблематикою, проте представлені результати свідчать про наявність більшого потенціалу щодо поліпшення цього процесу. Тому на кафедрі ПОЕМ була представлена конструкція стрічкової сушарки з ІЧ генераторами, що не лише реалізовує інноваційне джерело енергії, а й забезпечує процес сушіння у безперервному режимі. Перспективність даної установки підтверджується наявними результатами експериментальних досліджень.

Література

1. Li L., Zhang M., Bhandari B. Influence of Drying Methods on Some Physicochemical, Functional and Pasting Properties of Chinese Yam Flour. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.034>
2. Li Y., Li J.W., Fan L.P. Effects of Combined Drying Methods on Physicochemical and Rheological Properties of Instant *Tremella fuciformis* Soup. *Food Chemistry*, 2022, 396, 133644. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133644>
3. Kemal E., Özbek H.N., Göğüş F., Yanık D.K. Hot Air-Assisted Radio Frequency Drying of Grated Potato (*Solanum tuberosum* L.): Drying Behavior and the Associated Effect on Characteristics of Potato Flour. *Journal of Food Science*, 2022, 87, 4068–4081. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16265>
4. Junqueira L.A., Amaral T.N., Leite Oliveira N., Prado M.E.T., de Resende, J.V. Rheological Behavior and Stability of Emulsions Obtained from *Pereskia aculeata* Miller via Different Drying Methods. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1), 21–35. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1437177>
5. Gutiérrez M.C., Utrilla-Coello R.G., Soto-Castro D. Effect of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in the Ecological Extraction, Drying, and Storage of Eggplant Anthocyanins. *J Food Process Preserv*, 2018, 42, e13439. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13439>

6. Borad S.G., Singh A.K., Meena G.S., Arora S., Raju P.N., Sabikhi L. Optimization of Spray Drying of Colostrum Protein Ingredients – A Rheological Approach. *Journal of Food Engineering*, 2021, 288, 110247. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110247>
7. Both E.M., Siemons I., Boom R.M., Schutyser M.A.I. The Role of Viscosity in Morphology Development During Single Droplet Drying. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94, 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.023>
8. Siemons I., Vesper J., Boom R.M., Schutyser M.A.I., van der Sman R.G.M. Rheological Behaviour of Concentrated Maltodextrins Describes Skin Formation and Morphology Development During Droplet Drying. *Food Hydrocolloids*, 2022, p. 107442. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107442>
9. Ahmed J., Thomas L., Khashawi R. Influence of Hot Air and Freeze-Drying on Functional, Rheological, Structural and Dielectric Properties of Green Banana Flour and Dispersions. *Food Hydrocolloids*, 2019, 105331. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105331>
10. Mboukap, A.N., Klang M.J., Njapndounke B., Ndjang M.M.N., Ndomou S.C.H., Womeni H.M. Influence of Postharvest Natural Softening Conditions on the Nutritional Quality of Safou (*Dacryodes edulis* H.J.Lam) Flour: Rheological Properties of the Optimized Safou Flour. *International Journal of Food Science*, 2024, 6050991. <https://doi.org/10.1155/2024/6050991>
11. Кравченко О.Ю. Дослідження електродинамічного апарату для зневоднення неньютонівських рідин. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 143-148. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2977>

INNOVATIVE DRYING TECHNOLOGIES OF PLANT RAW MATERIAL OF RHEOLOGICAL STRUCTURE

Kravchenko O.Yu., graduate student
Odesa national university of technology, Odesa, Ukraine

Abstract. Key problems in the dehydration of food raw materials with rheological structure are identified. An analysis of literary sources devoted to solving the problems of materials' dehydration with non-Newtonian properties is presented. The most common method of removing moisture from rheological raw materials is spray drying. However, despite the efficiency of installations of this type, their operation is accompanied by significant energy and resource losses with the spent coolant. A separate problem is high processing temperatures, which extremely negatively affects the quality of the finished product. It is noted that the presence of a large number of works indicates the relevance of this direction and requires an innovative approach to organizing the dehydration processes of non-Newtonian liquids. When designing, it is worth being guided not only by the principles of energy and resource efficiency, but also by the possibility of organizing the drying process in continuous operation. Accordingly, a design of a belt drying apparatus with infrared energy sources was proposed. IR emitters are able to penetrate into the material within 2-4 mm. Therefore, in order to ensure the efficiency and quality of the drying process, the thickness of the food raw material layer should not exceed the specified regulations. Depending on the set value of the moisture content of the finished product, the apparatus provides for regulation of the speed of the belt conveyor and the power of the electromagnetic field of the IR range. The initial raw material is loaded both on special cassettes and directly onto the conveyor belt. In this case, a special raw material feed hopper is installed, and the required layer thickness is ensured by means of a regulator. The proposed design of a belt dryer with IR generators is characterized by its operability and high reliability, which is confirmed by the results of experimental studies. At the same time, it is of commercial interest when introduced into production due to the presence of a continuous operating mode.

Key words: food raw material, rheological structure, non-Newtonian liquids, infrared field, drying, dehydration.

References

1. Li L., Zhang M., Bhandari B. Influence of Drying Methods on Some Physicochemical, Functional and Pasting Properties of Chinese Yam Flour. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.034>
2. Li Y., Li J.W., Fan L.P. Effects of Combined Drying Methods on Physicochemical and Rheological Properties of Instant *Tremella fuciformis* Soup. *Food Chemistry*, 2022, 396, 133644. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133644>
3. Kemal E., Özbek H.N., Göğüş F., Yanık D.K. Hot Air-Assisted Radio Frequency Drying of Grated Potato (*Solanum tuberosum* L.): Drying Behavior and the Associated Effect on Characteristics of Potato Flour. *Journal of Food Science*, 2022, 87, 4068–4081. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16265>
4. Junqueira L.A., Amaral T.N., Leite Oliveira N., Prado M.E.T., de Resende, J.V. Rheological Behavior and Stability of Emulsions Obtained from *Pereskia aculeata* Miller via Different Drying Methods. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1), 21–35. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1437177>
5. Gutiérrez M.C., Utrilla-Coello R.G., Soto-Castro D. Effect of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in the Ecological Extraction, Drying, and Storage of Eggplant Anthocyanins. *J Food Process Preserv*, 2018, 42, e13439. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13439>
6. Borad S.G., Singh A.K., Meena G.S., Arora S., Raju P.N., Sabikhi L. Optimization of Spray Drying of Colostrum Protein Ingredients – A Rheological Approach. *Journal of Food Engineering*, 2021, 288, 110247. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110247>
7. Both E.M., Siemons I., Boom R.M., Schutyser M.A.I. The Role of Viscosity in Morphology Development During Single Droplet Drying. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94, 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.023>
8. Siemons I., Vesper J., Boom R.M., Schutyser M.A.I., van der Sman R.G.M. Rheological Behaviour of Concentrated Maltodextrins Describes Skin Formation and Morphology Development During Droplet Drying. *Food Hydrocolloids*, 2022, p. 107442. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107442>
9. Ahmed J., Thomas L., Khashawi R. Influence of Hot Air and Freeze-Drying on Functional, Rheological, Structural and Dielectric Properties of Green Banana Flour and Dispersions. *Food Hydrocolloids*, 2019, 105331. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105331>
10. Mboukap, A.N., Klang M.J., Njapndounke B., Ndjang M.M.N., Ndomou S.C.H., Womeni H.M. Influence of Postharvest Natural Softening Conditions on the Nutritional Quality of Safou (*Dacryodes edulis* H.J.Lam) Flour: Rheological Properties of the Optimized Safou Flour. *International Journal of Food Science*, 2024, 6050991. <https://doi.org/10.1155/2024/6050991>
11. Kravchenko O.Yu. Doslidzhennia elektrodynamichnoho aparatu dlia znevodnennia neniutonivskykh ridyn. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 143-148. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2977>

Отримано в редакцію 12.11.2024
Прийнято до друку 26.11.2024

Received 12.11.2024
Approved 26.11.2024