

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

Кравченко О. Ю., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Висвітлено актуальні проблеми процесу сушіння, особливу увагу приділено рослинній сировині реологічної структури. Розглянуто традиційні шляхи вирішення завдань зневоднення неньютонівських рідин, представлені у науковій літературі. Виділено перспективний напрямок щодо організації процесу дегідратації, який полягає у використанні іншого джерела енергії – інфрачервоного випромінювання. Проведено аналіз наукових публікацій, присвячених перевагам інфрачервоного поля у сфері масообмінних процесів. Підтверджено, що електромагнітне випромінювання інфрачервоного діапазону має великі перспективи при сушінні рослинної сировини. Однак в розглянутих роботах існує певний ряд недоліків, що не дозволяють максимально використати потенціал такого джерела енергії. Особливо це стосується конструкцій установок, на яких проводилися дослідження процесу сушіння. Найважливіший серед них – це періодичний режим роботи. Будь-які наукові дослідження повинні бути направлені на перспективу впровадження новітніх розробок у виробництво і безперервний режим роботи будь-якого обладнання є вагомою умовою і конкурентоспроможною рисою при впровадженні у промисловість. В зв'язку із цим було запропоновано електродинамічний апарат для зневоднення неньютонівських рідин, який дозволяє здійснювати цей процес в потоці. Стенд для проведення досліджень оснащений регуляторами потужності інфрачервоних модулів та швидкості руху стрічки. В результаті проведених експериментальних досліджень було отримано дані, які слугували для побудови важливих кінетичних залежностей. Найбільшу увагу привертають лінії швидкості сушіння. Вони показали, що значення швидкості сушіння чітко корелюють із рівнем підведеної потужності інфрачервоного поля. Швидкість руху стрічки привносила незначні зміни, тому швидкість сушіння змінювалась в невеликому діапазоні. Загалом, на основі отриманих результатів було підтверджено працездатність та перспективність розробленої конструкції стрічкового електродинамічного апарату.

Ключові слова: сушіння, зневоднення, дегідратація, харчові реологічні системи, неньютонівські рідини, інфрачервоне поле, експериментальне моделювання.

Вступ

Сушіння харчової сировини є одним із найбільш розповсюджених та енерговитратних процесів харчової промисловості. Однак не зважаючи на широке застосування цього методу обробки, на велику варіацію шляхів його організації, на багаторічну плідну працю світових науковців в сфері проблематики даного процесу, зневоднення й досі має певний ряд недоліків, пов'язаних із значними втратами теплової енергії, зниженням якості кінцевого продукту при довготривалому термічному навантаженні на термолабільні компоненти сировини, втратами ароматичних та смакових властивостей, а іноді і певної частки готового продукту із відпрацьованим теплоносієм при конвективному сушінні.

Самостійною проблемою є зневоднення рослинної сировини, що має реологічну структуру, а саме неньютонівські рідини. Високі значення динамічного коефіцієнту в'язкості чинять суттєвий негативний вплив на процес сушіння, створюючи високі значення внутрішніх дифузійних опорів. Таким чином, при постановці завдання щодо зневоднення сировини реологічної структури необхідно враховувати проблеми подібного характеру.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

Наукові дослідження, спрямовані на поліпшення процесу сушіння харчової сировини, представлені у великому різноманітті отриманих експериментальних даних, що відображені в авторитетних наукових виданнях. Наукова спільнота активно займається проблемами зневоднення, однак повноцінно вони так і не вирішені. Наприклад, у 2022 році вченими Кашмірського Університету (Індія) на прикладі яблучної суспензії, що являла собою неньютонівську рідину, було запропоноване зневоднення у розпилювальній сушарці [1]. Безумовно, такий метод дозволяє повноцінно видалити необхідну кількість вологи і отримати абсолютно сухий продукт. Однак температура сушильного агента в даній роботі сягала 160°C, що характерно для розпилювальних сушарок. Цілком очікувано, що якість порошку, отриманого при такій температурі, вкрай низька. До того ж забезпечення даного процесу супроводжується значними енерговитратами з відпрацьованим сушильним агентом. Відповідно до цього традиційні методи не в змозі забезпечити якісну дегідратацію даної сировини в умовах жорсткого енергодефіциту.

У пошуках нових підходів щодо вологовидалення досить часто намагаються не покращити вже існуючі методи, а знайти інноваційні важелі, які б дозволили організувати процес інакше. До таких важелів можна

віднести нові джерела енергії. Одним із таких джерел виступає інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. При залученні такого методу відсутня необхідність у використанні сушильного агенту, що в свою чергу обумовлює вагомое зниження енерговтрат. Однак ІЧ поле має низьку проникну здатність, тому товщина шару сировини, що висушується, не повинна перевищувати 3–4 мм.

Так, у 2023 році дослідниками Центрально-Південного університету лісового господарства і технологій (Китай) вивчався вплив ІЧ випромінювання на зневоднення слайсів імбиру у поєднанні з ультразвуком [2]. Висушування зразків товщиною 3 мм здійснювалось до 2% вологості. Потужність ІЧ поля становила 2000 Вт, ультразвукового поля – 500 Вт. Температура обробки становила 50–70°C. Відзначається, що отриманий продукт не зазнав суттєвих змін стосовно кольору.

Там же, у 2024 році було проведено дослідження процесу сушіння женьшеню в умовах ІЧ поля [3]. Сировина була нарізана скибками товщиною 2–4 мм та висушувалась за температури 40–60°C. При цьому тривалість процесу варіювалась в межах від 60 до 225 хвилин. Кінцевий вологовміст сушеного женьшеню становив близько 10%.

В цьому ж році в Університеті Бурси Улудаг (Туреччина) були організовані дослідження по зневодненню слайсів хурми під дією ІЧ випромінювання [4]. Температура процесу коливалась в діапазоні 22,65–106,33°C, час висушування до заданого значення вологовмісту становив 85–225 хвилин при різних режимах роботи ІЧ генераторів.

У 2023 році на базі Університету Хаккарі (Туреччина) вивчався вплив ІЧ випромінювання при зневодненні слайсів груші в умовах вакууму у порівнянні з традиційним конвективним методом сушіння [5]. Потужність ІЧ поля змінювалась в діапазоні 100–300 Вт, температура сушильного агенту при конвективному сушінні становила 40–70°C. Порівняльна характеристика отриманих зразків сушених фруктів при ІЧ та конвективному методах показала, що використання джерел енергії ІЧ діапазону набагато краще зберігає поживні, смакові та ароматичні компоненти сировини.

В тому ж році спільними зусиллями вченими Дослідницького інституту сільськогосподарського машинобудівництва (Єгипет) та Університетів Цзянсу (Китай) та Бенха (Єгипет) був досліджений інноваційний спосіб ІЧ сушіння слайсів яблук [6]. Товщина слайсів була в межах 2–6 мм, напруженість ІЧ поля становила 0,13, 0,225 та 0,341 Вт/см², кінцевий вологовміст слайсів сягав 11%. Результати експериментів показали, що колір готового продукту помітно погіршується при підвищенні потужності ІЧ випромінювання та збільшенні товщини шару сировини.

У 2022 році дослідником Технічного університету Їлдиз (Туреччина) було реалізовано процес сушіння слайсів апельсину товщиною 6 мм в ІЧ полі [7]. Кінцевий вологовміст апельсину становив 14,9%. Час зневоднення був в межах 210–315 хвилин при потужності ІЧ поля 62–88 Вт. Температури коливались від 30 до 90°C. Було відмічено, що колір зазнає суттєвих змін при підвищенні потужності ІЧ поля.

Також в цьому році науковці Дослідницького інституту сільськогосподарського машинобудівництва (Єгипет) та Університетів Цзянсу (Китай) та Бенха (Єгипет) було проведено експеримент щодо зневоднення 2 мм слайсів томатів шляхом взаємодії з ІЧ випромінюванням [8]. Напруженість ІЧ енергії змінювалась від 0,15 до 0,35 Вт/см². При збільшенні напруженості зростала швидкість сушіння, що позитивно відобразилось на питомих енерговитратах.

У 2021 році у Технічному університеті Їлдиз (Туреччина) дослідили процес сушіння слайсів картоплі в умовах дії ІЧ поля [9]. Діапазон потужностей ІЧ випромінювання був в межах 38–88 Вт. Аналіз результатів досліджень показав, що збільшення потужності ІЧ поля веде до зростання швидкості вологовидалення, однак знижує відновлювальну здатність.

У тому ж році працівниками Лундського університету (Швеція), Центрально-Південного університету лісового господарства і технологій (Китай) та Харбинського політехнічного університету (Китай) проведено порівняльний аналіз технологій сушіння в умовах ІЧ випромінювання на різних харчових продуктах [10]. В цілому відмічено, що залучення ІЧ поля для вирішення проблем зневоднення суттєво покращує процес як з точки зору енергоефективності, так і зі сторони якості сухого продукту.

Відповідно до проведеного аналізу наявних результатів досліджень щодо перспектив використання електромагнітної енергії ІЧ діапазону в завданнях сушіння харчової сировини можна стверджувати, що позитивні сторони такого підходу явно є. Однак повноцінної можливості таких джерел енергії досі не розкриті. Як мінімум періодичні режими роботи розглянутих конструкцій спонукають до пошуку можливостей переходу на безперервний режим [11].

Модель електродинамічного апарату

При розробці установки для зневоднення неньютонівських рідин головною умовою була реалізація безперервного режиму роботи. Таким чином, була запропонована конструкція стрічкового апарату (рис. 1), оснащеного модулями з ІЧ випромінювачами 1. Модулі встановлені на тунельну камеру 2, всередині якої проходить стрічка 3, що транспортує касети із сировиною в процесі зневоднення. Рух стрічки забезпечується за рахунок привідного барабану 4. Натяжний барабан 5 унеможливує провисання стрічки.

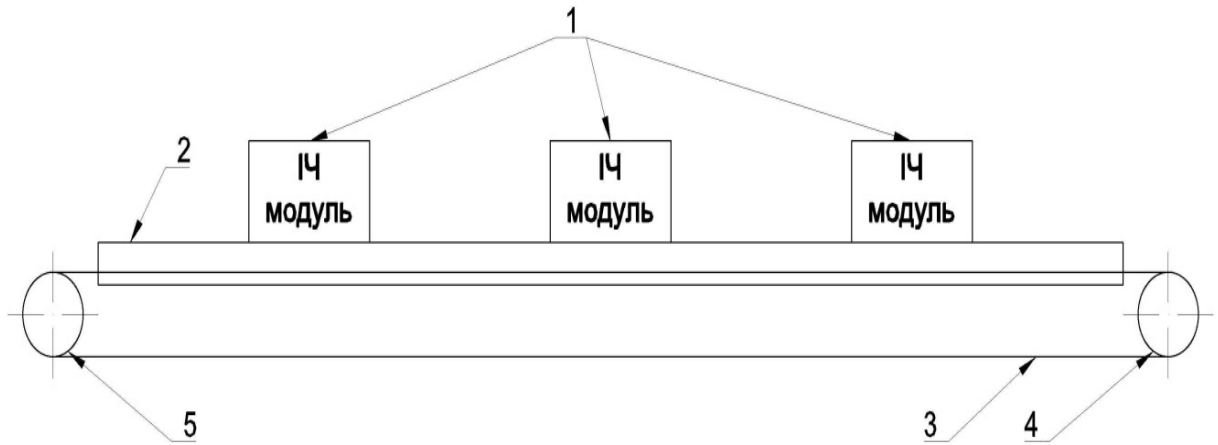


Рис. 1 – Електродинамічний стрічковий апарат для зневоднення неньютонівських рідин.

Довжина установки дає можливість досягти бажаного вологовмісту при одному проходженні касети. В залежності від заданого кінцевого значення вологовмісту передбачене регулювання швидкості стрічки за допомогою крокового двигуна. Вмикання ІЧ модулів та регулювання їх потужності здійснюється через блок керування, якими оснащені усі модулі. Додатково установка оснащена приладами для фіксації енергоспоживання, що дає змогу розрахувати питомі енерговитрати та визначити ефективність даної конструкції для кожного типу сировини.

Основні результати досліджень

Експериментальні дослідження проводились на основі реалізованого раніше аналітичного моделювання процесу зневоднення неньютонівських рідин в умовах дії ІЧ поля [12]. Завдяки цьому моделюванню було виділено основні параметри процесу сушіння реологічної сировини ІЧ випромінюванням, які чинять суттєвий вплив на кінетику та енергетику.

На першому етапі було проведено дослідження процесу зневоднення реологічної сировини при різних потужностях ІЧ поля та сталій швидкості руху стрічки 0,033 м/с (рис. 2).

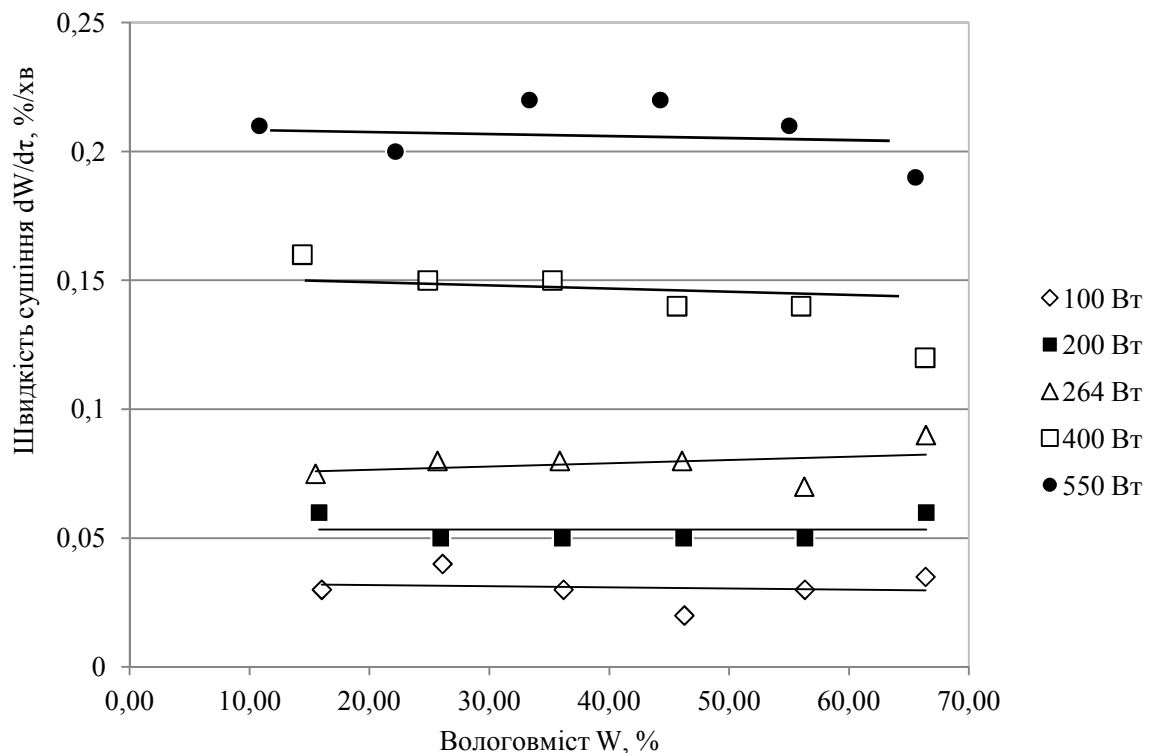


Рис. 2 – Графік залежності швидкості сушіння від потужності ІЧ поля

В якості об'єкту досліджень було обрано яблучні вичавки, що являють собою відходи сокового виробництва. За структурою їх можна віднести до реологічних систем. Сировина, масою 0,1 кг, розмішувалась на спеціальних касетах, що транспортувались стрічковим конвеєром. Після кожного проходження здійснювалось зважування касет на аналітичних вагах Radwag RC 750/C/1 з високою точністю з метою визначення швидкості вологовидалення. Температура експериментальних зразків вимірювалась за допомогою пірометра Benetech GM320. Потужність ІЧ випромінювання змінювалась в межах 100–550 Вт. Швидкість руху стрічки регулювалась за допомогою потенціометра та була в межах 0,011–0,033 м/с.

Виходячи з отриманої залежності можна стверджувати, що процес зневоднення неньютонівської структури супроводжується сталими значеннями швидкостей сушіння навіть при низьких значеннях вологовмісту на кожному рівні потужності ІЧ поля. Наступним кроком було визначення впливу швидкості стрічки на кінетику процесу сушіння при сталому значенні потужності ІЧ випромінювання у 264 Вт (рис. 3).

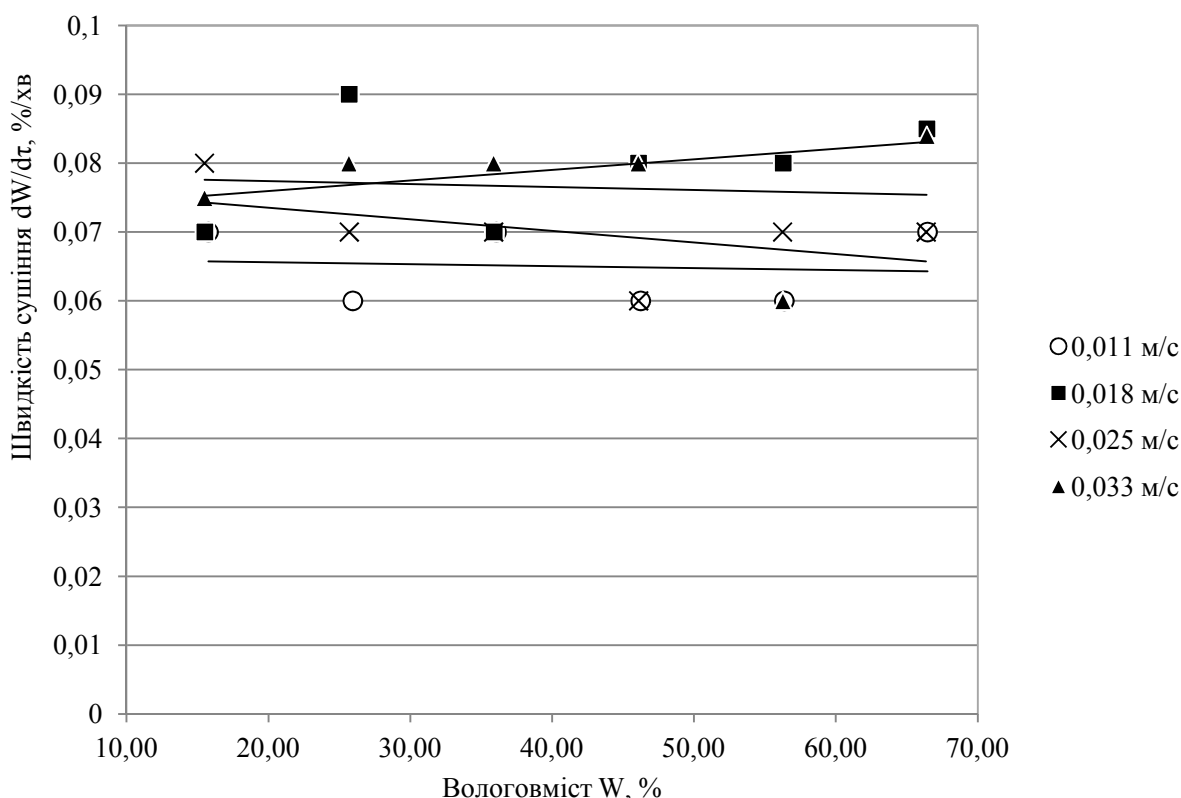


Рис. 3 – Графік залежності швидкості сушіння від швидкості руху стрічки

В результаті отриманих ліній швидкості сушіння для різних режимів руху стрічки видно, що швидкість стрічки не суттєво впливає на кінетику процесу зневоднення. Загалом значення варіюються в діапазоні 0,06–0,08 %/хв.

Висновки. Експериментальні дослідження, проведені на розробленому електродинамічному апараті цілком підтвердили його працездатність. ІЧ випромінювання добре підходить для вирішення завдань по зневодненню неньютонівських рідин. Окремою вимогою для забезпечення рівномірності висушування матеріалу є невеликі значення товщини шару продукту.

References

- Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Naseer B., Bhat T., Vijaykumar, Wani F.J. Spray Dried Apple Powder: Qualitative, Rheological, Structural Characterization and Its Sorption Isotherm. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 165, 113694. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113694>
- Zhang D., Huang D., Zhang Yi., Lu Yi., Huang Sh., Gong G., Li L. Ultrasonic Assisted Far Infrared Drying characteristics and Energy Consumption of Ginger Slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106287>
- Zhang Yi., Lu Yi., Huang D., Zhao H., Huang Sh., Zhang L., Gong G., Li L. Infrared Drying Characteristics and Optimization of Ginseng. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104334>

4. Ahmet Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of Freeze, Continuous, and Intermittent Infrared Drying methods for Sliced Persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, 89, 2332–2346. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>
5. Topuz F.C., Uğurlu S., Bakkalbaşı E. Comparison of a Novel Vacuum-Combined Infrared and Hot-Air Convection Methods for Drying of Deveci (*Pyrus communis* L.) Pear Slices. *Latin American Applied Research*, 2023, 53(4), 317–325. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2023.1200>
6. El-Mesery H.S., Ashiagbor K., Hu Z., Alshaer W.G. A Novel Infrared Drying Technique for Processing of Apple Slices: Drying Characteristics and Quality Attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52, 103676. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>
7. Doymaz I. Drying, Colour and Rehydration Characteristics of Orange Slices Under Infrared Radiation Heating. *Latin American Applied Research*, 2022, 52(1), 43–48. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.826>
8. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Alshaer W.G. Thin-Layer Drying Characteristics, Modeling and Quality Attributes of Tomato Slices Dried with Infrared Radiation Heating. *Bioscience Journal*, 2022, 38, e38049. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-42303>
9. Doymaz I. Drying, Drying Behavior and Some Quality Parameters of Potato Finger Chips Using Infrared Radiation. *Latin American Applied Research*, 2021, 51(4), 261–267. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2021.779>
10. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sunden B. Application of Infrared Radiation in the Drying of Food Products. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
11. Burdo O.G. *Evolutsiya sushilnyih ustanovok*. – Odessa: Poligraf, 2010. – 368s.
12. Kravchenko O.Yu., Tersiiiev S.G. Doslidzhennia protsesiv znevodnennja reolohichnoi syrovyny v ICh poli. *Scientific Works*, 2023, 87(1), 123–129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2702>

RESEARCH OF ELECTRODYNAMIC APPARATUS FOR NON-NEWTONIAN LIQUIDS DEHYDRATION

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

Abstract. The current problems of the drying process are highlighted, with special attention paid to plant raw materials of rheological structure. Traditional ways of solving the problems of non-Newtonian liquids dehydration, presented in the scientific literature, are considered. A promising direction for organizing the dehydration process is highlighted, which consists in using another energy source - infrared radiation. An analysis of scientific publications devoted to the advantages of the infrared field in the field of mass transfer processes is carried out. It is confirmed that electromagnetic radiation of the infrared range has great prospects for drying plant raw materials. However, in the considered works there are a number of shortcomings that do not allow to use the maximum potential of such an energy source. This especially applies to the designs of the installations on which the drying process was studied. The most important among them is the periodic mode of operation. Any scientific research should be aimed at the prospect of introducing the latest developments into production, and the continuous operation of any equipment is a significant condition and competitive feature when introduced into industry. In this regard, an electrodynamic apparatus for dewatering non-Newtonian liquids was proposed, which allows this process to be carried out in a continuous mode. The stand for conducting research is equipped with regulators of the infrared modules power and the belt speed. As a result of the experimental research, data were obtained that served to construct important kinetic dependencies. The drying speed lines attract the most attention. They showed that the values of the drying speed clearly correlate with the supplied power level of the infrared field. The belt movement speed introduced insignificant changes, so the drying speed varied in a small range. In general, based on the results obtained, the operability and prospects of the developed design of the belt electrodynamic apparatus were confirmed.

Keywords: drying, dehydration, food rheological systems, infrared field, analytical and experimental modeling.

Список використаної літератури

1. Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Naseer B., Bhat T., Vijaykumar, Wani F.J. Spray Dried Apple Powder: Qualitative, Rheological, Structural Characterization and Its Sorption Isotherm. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 165, 113694. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113694>
2. Zhang D., Huang D., Zhang Yi., Lu Yi., Huang Sh., Gong G., Li L. Ultrasonic Assisted Far Infrared Drying characteristics and Energy Consumption of Ginger Slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106287>
3. Zhang Yi., Lu Yi., Huang D., Zhao H., Huang Sh., Zhang L., Gong G., Li L. Infrared Drying Characteristics and Optimization of Ginseng. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104334>
4. Ahmet Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of Freeze, Continuous, and Intermittent Infrared Drying Methods for Sliced Persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, 89, 2332–2346. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>

5. Topuz F.C., Uğurlu S., Bakkalbaşı E. Comparison of a Novel Vacuum-Combined Infrared and Hot-Air Convection Methods for Drying of Deveci (*Pyrus communis* L.) Pear Slices. *Latin American Applied Research*, 2023, 53(4), 317–325. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2023.1200>
6. El-Mesery H.S., Ashiagbor K., Hu Z., Alshaer W.G. A Novel Infrared Drying Technique for Processing of Apple Slices: Drying Characteristics and Quality Attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52, 103676. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>
7. Doymaz I. Drying, Colour and Rehydration Characteristics of Orange Slices Under Infrared Radiation Heating. *Latin American Applied Research*, 2022, 52(1), 43–48. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.826>
8. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Alshaer W.G. Thin-Layer Drying Characteristics, Modeling and Quality Attributes of Tomato Slices Dried with Infrared Radiation Heating. *Bioscience Journal*, 2022, 38, e38049. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-42303>
9. Doymaz I. Drying, Drying Behavior and Some Quality Parameters of Potato Finger Chips Using Infrared Radiation. *Latin American Applied Research*, 2021, 51(4), 261–267. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2021.779>
10. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sunden B. Application of Infrared Radiation in the Drying of Food Products. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
11. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: Полиграф, 2010. – 368с.
12. Кравченко О.Ю., Терзієв С.Г. Дослідження процесів зневоднення реологічної сировини в ІЧ полі. *Scientific Works*, 2023, 87(1), 123-129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2702>

Отримано в редакцію 10.08.2024

Прийнято до друку 25.09.2024

Received 10.08.2024

Approved 25.09.2024