

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ РЕОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ В ІЧ ПОЛІ

Кравченко О.Ю., аспірант, Терзієв С.Г., д.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Харчові виробництва досить часто характеризуються наявністю відходів харчової сировини, частка яких може досягати 2/3 загального об'єму початкової сировини. Зазвичай цінність таких відходів достатньо висока, тому питання про їх утилізацію із дотриманням принципів ресурсо- та енергоефективності є досить актуальним. Запропоновано залучити технології зневоднення для отримання з харчових відходів нових видів продуктів або інгредієнтів для використання на харчових виробництвах. Однак серед труднощів організації такого процесу є реологічна структура відходів, що суттєво може завадити виходу вологи. З урахуванням фізичних особливостей сировини було запропоновано джерело енергії інфрачервоного діапазону. Проведено критичний аналіз результатів зневоднення харчової сировини в умовах дії ІЧ поля. Визначено перспективність даного напрямку, незважаючи на наявні недоліки представлених конструкцій сушарок, головною серед яких є періодичний режим роботи. Запропоновано конструкцію стрічкової сушильної установки з ІЧ випромінювачами, що забезпечить зневоднення харчової сировини в потоці. В ході аналітичного моделювання представлено параметричну та фізичну моделі процесу сушіння в ІЧ полі. На їх основі методом теорії подібності була отримана неявна модель розрахунку стрічкових ІЧ сушарок. В результаті експериментального моделювання визначено вплив товщини шару на кінетику зневоднення реологічної сировини. В якості об'єктів досліджень були обрані відходи сокового виробництва, а саме овочеві та фруктові вичавки. На основі побудованих термограм можна стверджувати про низьке термічне навантаження на термолабільні компоненти, оскільки температура процесу не перевищувала 50°C. Отримані лінії сушіння свідчать про постійну швидкість вологовидалення аж до 30% вологи в продукті.

Ключові слова: сушіння, зневоднення, харчові реологічні системи, інфрачервоне поле, аналітичне та експериментальне моделювання.

Вступ. Сучасні проблеми розвитку харчових виробництв мають вирішуватись на принципах екоіндустрії та енергоефективності. Тому, інноваційні технології повинні забезпечити зниження втрат сировинних та енергетичних ресурсів й зменшити навантаження на довкілля. В першу чергу треба вирішити завдання утилізації відходів харчової сировини, які часто складають до двох третин від початкового об'єму. При цьому, часто це дорога сировина, а комерційна вартість вилучення залишкових компонентів у відходах іноді перевищує й сам готовий продукт. Але традиційне обладнання не в змозі вирішити такі проблеми із-за складних реологічних властивостей цих відходів.

В роботі поставлено завдання розробити методи зневоднення реологічної сировини – відходів консервних, олійних та харчоконцентратних виробництв. Їх відходи – вичавки, шлами, макухи – це вологі, реологічні системи, які створюють суттєві екологічні проблеми. Метою роботи є створення енергоефективного обладнання для зневоднення відходів із їх складними реологічними особливостями.

На першому етапі було поставлено завдання експериментально визначити ефективність сушіння макухи в результаті виробництва овочевих та фруктових соків. Інноваційним підходом в дослідженнях стало використання електромагнітних джерел енергії ІЧ діапазону. Дослідження проведено в лабораторії «Харчові нанотехнології» на експериментальному стенді, основними вузлами якого були: камера з ІЧ генератором, касета з сировиною, яка підвішувалась до ваг. Основні результати досліджень в сушарках камерного типу наведено в роботі авторів [1].

На другому етапі вирішувалось завдання розробки обладнання для зневоднення реологічних харчових систем на стрічкових установках із ІЧ джерелами енергії. Послідовно проведено аналіз параметричної, фізичної та математичної моделей. Ускладнення стосується фактору руху стрічки, який враховується відповідним дифузійним числом Стантона. Результати аналітичного аналізу визначили чіткі завдання експериментальних досліджень.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. Використання інфрачервоного випромінювання в процесах зневоднення харчової сировини широко досліджується науковою спільнотою. Наявність великої кількості робіт, присвячених сушінню в умовах ІЧ поля, свідчить про серйозні перспективи такої технології у вирішенні проблем ресурсо- та енергоефективності.

Так, у 2021 році вченими Університету Цзянсу (Китай) був досліджений процес сушіння слайсів джекфруту як в умовах самостійної дії ІЧ поля, так і в комбінації з ультразвуком [2]. В результаті було визначено, що при підведеній потужності ІЧ поля 900, 1200 та 1500 Вт температура зразків сягала 58,6, 74,2 та 91,1°C відповідно. При цьому залучення ультразвуку призводило до збільшення температури зразків в середньому

на 5°C. Тривалість процесу сушіння до постійного значення маси зразків становила від 1,5 (1500 Вт) до 6 (900 Вт) годин.

В тому ж році у Хенанському університеті науки і технологій (Китай) був проведений порівняльний аналіз конвективної (КС), ІЧ сушарок та ІЧ сушарки псевдозріженого шару сировини [3]. В якості об'єкту досліджень був обраний арахіс. Експериментальні дослідження показали, що ІЧ сушіння у псевдозріженому шарі у порівнянні з КС та ІЧ дозволяє скоротити час сушіння на 40% та 33%, а питомі енерговитрати на 66% та 32% відповідно.

Про перспективи ІЧ джерел в сушінні говориться і в критичному огляді технологій зневоднення овочів та коренеплодів, що був проведений у 2023 році спільними зусиллями вчених Норвезького інституту досліджень продовольства, рибальства та аквакультури та Преторійського університету (Південна Африка) [4]. Разом з ІЧ полем розглядаються також сонячне, мікрохвильове (МХ) та радіочастотне (РЧ) джерела енергії.

В цьому ж році на базі Університету Урмії проводилися досліді з висушування пелюстків шафрану конвективним методом та в умовах ІЧ поля [5]. Температурний діапазон процесу сушіння коливався в межах 40–60°C. У 2022 році в Тегеранському університеті були проведені досліді з комбінованого впливу таких технологій [6].

Науковцями Китайського сільськогосподарського університету, Університету Нового Південного Уельсу (Австралія) та Пекінського університету технологій та бізнесу у 2022 році також досліджувався процес зневоднення у конвективній сушарці з ІЧ джерелами енергії [7]. В якості сировини виступали квіти хризантеми, що мають високу лікарську та естетичну цінність, початкова вологість яких становила близько 75%. Квіти висушувалися до вологості близько 10%. Температура процесу коливалася в межах 55–75°C.

В результаті аналізу літературних джерел було виявлено широкий інтерес до визначення можливостей ІЧ поля при вирішенні проблем зневоднення харчової сировини. Однак запропоновані конструкції сушильного обладнання передбачають роботу лише в періодичному режимі. При організації безперервної роботи ІЧ сушарок важливо враховувати фактор руху сировини, який значно ускладнює процес сушіння. Особливо це стосується реологічних харчових систем.

Метою даної роботи є дослідження кінетики зневоднення харчової сировини реологічної структури на базі стрічкової сушарки з ІЧ модулями враховуючи досвід лабораторії «Харчові нанотехнології» [8–10].

Постановка задачі моделювання. Особливістю електромагнітного підведення енергії є те, що максимальні значення і температури, і вмісту вологи розташовані всередині продукту. Ця відмінність від традиційних (конвективних та кондуктивних) способів підведення енергії дозволяє суттєво знизити витрати енергії на зневоднення [8]. Рівень енергетичних витрат залежить від узгодження параметрів електромагнітного поля, структури продукту, швидкості його переміщення та параметрів повітряного середовища. Ключовий вплив має схема ініціювання потоку вологи продукту при максимальних значеннях рушійної сили процесу вологоперенесення. Параметрична модель стрічкової сушарки з ІЧ модулями має вигляд (рис. 1).

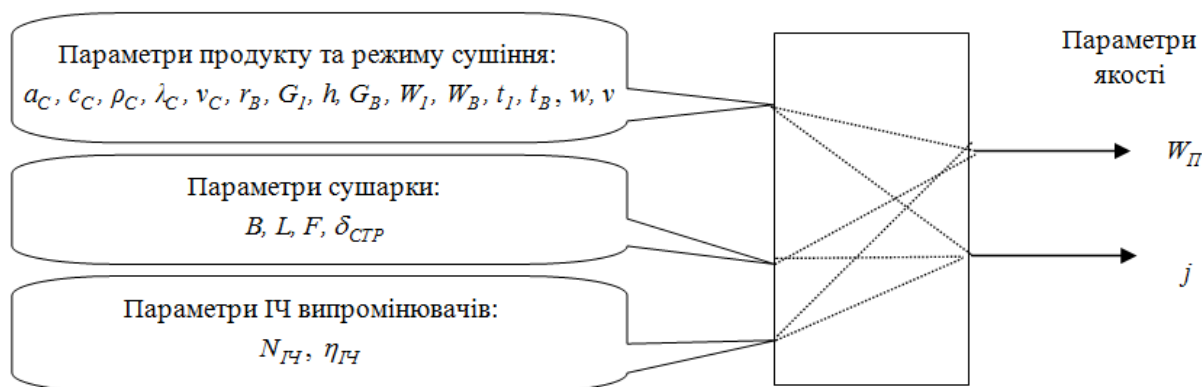


Рис. 1 – Параметрична модель стрічкової сушарки

Параметрами якості виступають вологовміст готового продукту W_P і питомі енерговитрати на зневоднення j , Дж/кг. Основними вхідними параметрами сировини є: його витрати G_1 , кг/с, вологовміст W_1 , температурна t_1 , теплофізичні властивості сировини ($a_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, v_c, r_B$). Потік повітря, що проходить послідовно через камери сушарки, характеризується його витратою G_B , вмістом вологи W_B , швидкістю v і температурою t_B . Ключовими характеристиками сушарки є конструктивні параметри стрічки: її ширина B , довжина L , товщина $\delta_{СТР}$, швидкість переміщення w та площа поверхні F . В якості енергетичних параметрів сушарки виступають потужність ($N_{ІЧ}$) та ККД ($\eta_{ІЧ}$) інфрачервоних випромінювачів.

Математична модель зневоднення в ІЧ полі. Постановкою завдання моделювання є фізична схема сушарки з ІЧ генераторами енергії (рис. 2).

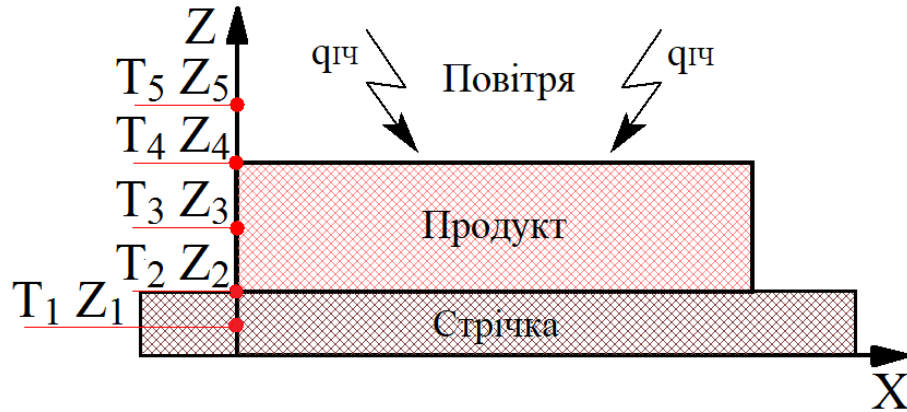


Рис. 2 – Фізична модель зневоднення

Нестационарна модель тепломасоперенесення формується у двовимірному представленні відносно осей Z та X . Представимо систему рівнянь, яка описує процеси, що протікають.

1) За умов $Z > Z_4$ (об'єм повітря):

Рівняння Нав'є – Стокса:

$$\rho_g \cdot \omega_g \cdot \left(\frac{\partial \omega_g}{\partial x} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} \right) = \rho_g \cdot g - \frac{\partial P_g}{\partial x} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + \mu_g \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_g}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_g}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_g \rho_g} \quad (2)$$

За рахунок того, що внутрішні джерела тепловиділення у повітрі відсутні, значення складової $\frac{q_v}{c_g \rho_g}$ зводиться до нуля:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_g}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{1}{\rho_g} \cdot \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \omega_g}{\partial y} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

За умов $Z = Z_4$ (межа контакту фаз «повітря – сировина»):

Тут діють електромагнітні джерела енергії за граничних умов II роду:

До об'єму сировини, за умов $Z_2 < Z < Z_4$:

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_{ГЧ}}{c_c \rho_c} \right] \quad (5)$$

Рівняння Фіка:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} v_z \quad (6)$$

При зворотному русі стрічка має контакт із повітрям, ($Z = Z_1$):

Рівняння Нав'є – Стокса:

$$\rho_g \cdot \omega_g \cdot \left(\frac{\partial \omega_g}{\partial x} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} \right) = \rho_g \cdot g - \frac{\partial P_g}{\partial x} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + \mu_g \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_g}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_g \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \omega_s}{\partial y} + \frac{\partial \omega_s}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Система рівнянь (1–9) описує нестационарне двовимірне поле температур і вологовмісту продукту, як по товщині шару, так і по розташуванню на стрічці. Умови на границях середовища, продукту та стрічки представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Зведення граничних умов моделі сушіння

Координата на рис. 2	Тип ГУ	Модель ГУ
$Z = Z_4$ (межа продукту та середовища)	III роду	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_{II}}(t_{II} - t_B)$ (10)
$Z_2 < Z < Z_4$ (об'єм продукту)	II роду	$q_v = q_{IЧ} = const$ (11)
$Z = Z_2$ (межа продукту та стрічки)	IV роду	$\lambda_{II} \frac{\partial t}{\partial n} \Big _{cm1} = \lambda_{СТР} \frac{\partial t}{\partial n} \Big _{cm2}$ (12)
$Z = Z_1$ (межа стрічки та середовища)	III роду	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_{СТР}}(t_{СТР} - t_B)$ (13)

Система рівнянь (10–13) представляє собою нестационарну модель, що поєднує теплоаеродинамічні процеси та процеси масоперенесення.

Наразі отриману математичну модель аналітично розв'язати неможливо. Виходячи з цього пропонується спростити її з використанням методу аналізу розмірностей. У попередній роботі [1] була отримана модель для процесу ІЧ сушіння у нерухомому шарі. При моделюванні процесу зневоднення в режимі безперервної роботи необхідно враховувати фактор руху сировини. На основі параметричної моделі (рис. 1) та з використанням методу теорії подібності була отримана модель:

$$St_\theta = A \cdot (Pe)^m \cdot (Bu)^p \cdot (Ff)^k \quad (14)$$

що враховує фактор руху за рахунок використання дифузійного числа Стантона:

$$St_\theta = \frac{\beta_e}{w} \quad (15)$$

де, β_e – ефективний коефіцієнт дифузії, м/с;

w – швидкість руху сировини, м/с.

Числа подібності Pe , Bu та фактор форми Ff аналогічні тим, що представлені у попередній роботі [1].

Основні результати досліджень.

Згідно параметричної моделі (рис. 1) послідовно вивчався вплив потужності поля, товщина шару, тип сировини на кінетику зневоднення макухи.

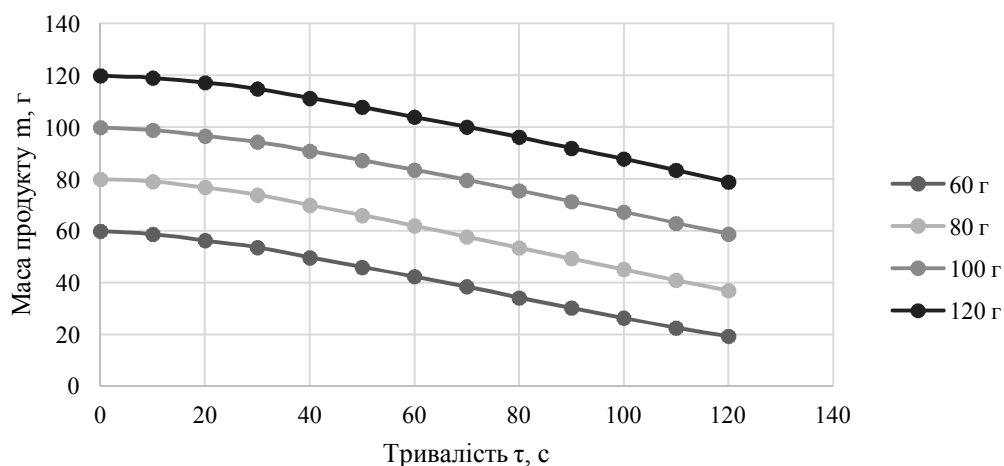


Рис. 3 – Кінетика зневоднення яблучних вичавків

Швидкість стрічки дорівнювала 0,018 м/с. Після виходу касет із камери сушіння їх маса визначалась за допомогою ваг, а температура – пірометром. За результатами (рис. 3) розраховувались лінії швидкості сушіння (рис. 4).

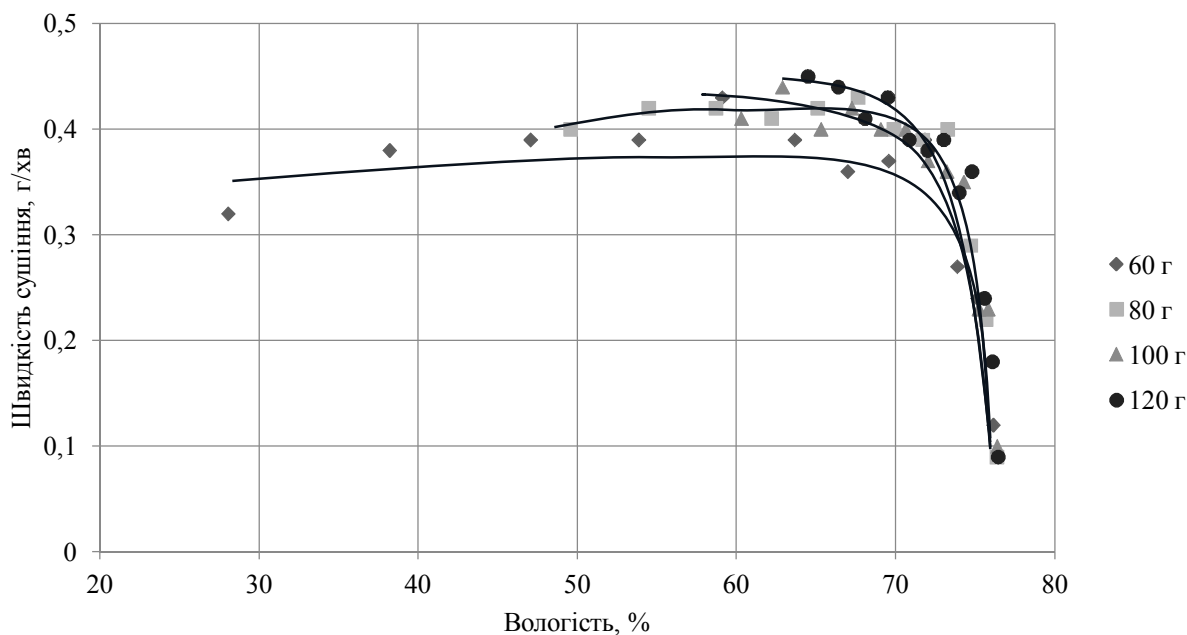


Рис. 4 – Залежність швидкості зневоднення яблучних вичавків від вологості

Виходячи із результатів отриманої залежності (рис. 4) можна стверджувати, що швидкість зневоднення аж до 30% вологості сировини є відносно сталою, що підкреслює перспективність використання ІЧ випромінювання в задачах дегідратації харчової сировини.

Температура сировини на протязі всього процесу не перевищувала 50°C (рис. 5).

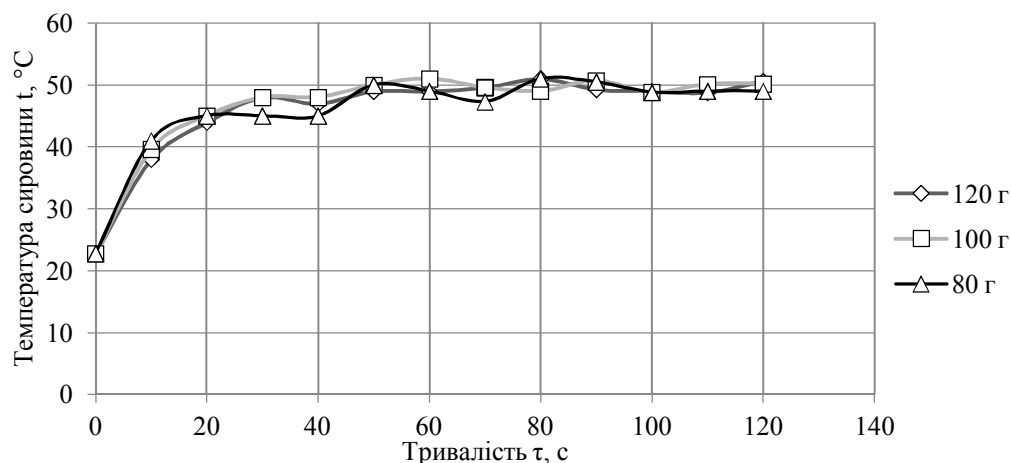


Рис. 5 – Термограми в процесі зневоднення

Проаналізувавши отриманні термограми можна зробити припущення, що харчова цінність кінцевого продукту є досить високою, навіть якщо початкова сировина є термолабільною, що пояснюється низьким термічним навантаженням.

Висновки. Результати дослідів довели, що температурні умови ІЧ обробки сировини на стрічці забезпечують збереження якості сировини. Переваги при цьому мають режими із меншою товщиною шару сировини. Отримана неявна модель у критеріальній формі є основою алгоритму розрахунку стрічкових сушарок з ІЧ генераторами енергії.

References

1. Kravchenko O.Yu., Molchanov M.Yu., Milinchuk K.S., Tersiiiev S.G., Petrovskiy V.V. (2022). Doslidzhennia protsesiv sushinnia reolohichnykh kharchovykh system v ICh poli. *Scientific Works*, 86(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2409>

2. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. (2021) Enhancing Jackfruit Infrared Drying by Combining Ultrasound Treatments: Effect on Drying Characteristics, Quality Properties and Microstructure. *Food Chemistry*, 358, 129845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129845>
3. Zhu K., Li L., Ren G., Duan X., Cao W., Qiu C. (2021) Efficient Production of Dried Whole Peanut Fruits Based on Infrared Assisted Spouted Bed Drying. *Foods*, 10(10), 2383. <https://doi.org/10.3390/foods10102383>
4. Skåra T., Løvdaal T., Skipnes D., Mehloimakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. (2023) Drying of Vegetable and Root Crops by Solar, Infrared, Microwave, and Radio Frequency as Energy Efficient Methods: A Review. *Food Reviews International*, 39:9, 7197-7217. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2148688>
5. Sharifian F., Gharkhloo Z.R., Yamchi A.A., Kaveh M. (2023) Infrared and Hot Drying of Saffron Petal (*Crocus sativus* L.): Effect on Drying, Energy, Color, and Rehydration. *Journal of Food Process Engineering*, 46(7), e14342. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14342>
6. Hosseinalipour S.M., Zaghari P. (2022) Design and Fabrication of Catalytic Infrared Fruit Dryer to Evaluate Its Performance in the Bananas Drying Process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e16627. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16627>
7. Xu H., Wu M., Wang Y., Wei W., Sun D., Li D., Zheng Z., Gao F. (2022). Effect of Combined Infrared and Hot Air Drying Strategies on the Quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) Cakes: Drying Behavior, Aroma Profiles and Phenolic Compounds. *Foods*, 11(15): 2240. <https://doi.org/10.3390/foods11152240>
8. Burdo O.G. (2010). *Evolutsiya sushilnykh ustanovok*. Odessa: Poligraf, 368.
9. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(49), 86–98. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.13>
10. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. (2020) System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>

RESEARCH OF DEHYDRATION PROCESSES OF RHEOLOGICAL PLANT RAW MATERIAL IN THE IR FIELD

Kravchenko O.Yu., graduate student, Terziev S.G., Doc. Tech. Sci., associate professor
Odesa national university of technology, Odesa, Ukraine

Abstract. Food production is quite often characterized by the presence of waste food raw materials, the share of which can reach 2/3 of the total volume of initial raw materials. Usually, the value of such waste is quite high, so the issue of their disposal in compliance with the principles of resource and energy efficiency is quite relevant. It is proposed to involve dehydration technologies to obtain from food waste new types of products or ingredients for use in food production. However, among the difficulties of organizing such a process is the rheological structure of the waste, which can significantly hinder the release of moisture. Taking into account the physical characteristics of raw materials, an infrared energy source was proposed. A critical analysis of the results of food raw materials dehydration under the conditions of the IR field was carried out. The prospects of this direction have been determined, despite the existing shortcomings of the presented designs of dryers, the main one of which is the periodic mode of operation. The design of a belt drying unit with IR emitters is proposed, which will ensure the dehydration of food raw materials in the flow. By the analytical modeling, parametric and physical models of the drying process in the IR field are presented. Based on them, an implicit model for the calculation of belt IR dryers was obtained using the method of similarity theory. As a result of experimental modeling, the influence of layer thickness on the kinetics of dehydration of rheological raw materials was determined. Juice production wastes, namely vegetable and fruit juices, were chosen as objects of research. On the basis of the constructed thermograms, it is possible to assert a low thermal load on thermolabile components, since the temperature of the process did not exceed 50°C. The resulting drying lines indicate a constant rate of moisture removal up to 30% of moisture in the product.

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

Список використаної літератури

1. Кравченко О.Ю., Молчанов М.Ю., Мілінчук К.С., Терзів С.Г., Петровський В.В. Дослідження процесів сушіння реологічних харчових систем в ІЧ полі. *Scientific Works*, 2022, 86(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2409>
2. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. Enhancing Jackfruit Infrared Drying by Combining Ultrasound Treatments: Effect on Drying Characteristics, Quality Properties and Microstructure. *Food Chemistry*, 2021,

- 358, 129845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129845>
3. Zhu K., Li L., Ren G., Duan X., Cao W., Qiu C. Efficient Production of Dried Whole Peanut Fruits Based on Infrared Assisted Spouted Bed Drying. *Foods*, 2021, 10(10), 2383. <https://doi.org/10.3390/foods10102383>
 4. Skåra T., Løvdaal T., Skipnes D., Mehloimakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. Drying of Vegetable and Root Crops by Solar, Infrared, Microwave, and Radio Frequency as Energy Efficient Methods: A Review. *Food Reviews International*, 2023 39:9, 7197-7217. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2148688>
 5. Sharifian F., Gharkhloo Z.R., Yamchi A.A., Kaveh M. Infrared and Hot Drying of Saffron Petal (*Crocus sativus* L.): Effect on Drying, Energy, Color, and Rehydration. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(7), e14342. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14342>
 6. Hosseinalipour S.M., Zaghari P. Design and Fabrication of Catalytic Infrared Fruit Dryer to Evaluate Its Performance in the Bananas Drying Process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46, e16627. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16627>
 7. Xu H., Wu M., Wang Y., Wei W., Sun D., Li D., Zheng Z., Gao F. Effect of Combined Infrared and Hot Air Drying Strategies on the Quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) Cakes: Drying Behavior, Aroma Profiles and Phenolic Compounds. *Foods*, 2022, 11(15): 2240. <https://doi.org/10.3390/foods11152240>
 8. Бурдо О.Г. *Еволюція сушильних установок*. – Одеса: Поліграф, 2010. – 368с.
 9. Burdo O.G., Sirotiyuk I.V., Shcherbich M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*, 2021, 1(49), 86–98. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.13>
 10. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotiyuk I.V., Shcherbich M.V. System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2020, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>

Отримано в редакцію 28.06.2023
Прийнято до друку 28.11.2023

Received 28.06.2023
Approved 28.11.2023