

SECTION 8. FOOD TECHNOLOGIES

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-661-4-11>

INTENSIFICATION OF DRYING OF THERMOLABILE MATERIALS USING HEAT PUMP CYCLES

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕПЛОНАСОСНИХ ЦИКЛІВ

Dabizha N. O.

*Candidate of Technical Sciences, Senior
Research Fellow,
Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences
of Ukraine
Kyiv, Ukraine*

Дабіжа Н. О.

*кандидат технічних наук, старша
наукова співробітниця,
Інститут технічної теплофізики
Національної академії наук України
м. Київ, Україна*

Husarova O. V.

*Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department
of Chemical Engineering and Oil
Refining Industry,
National Technical University
of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute";
Senior Research Fellow,
Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences
of Ukraine
Kyiv, Ukraine*

Гусарова О. В.

*кандидат технічних наук,
старша викладачка кафедри машин
та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»;
старша наукова співробітниця,
Інститут технічної теплофізики
Національної академії наук України
м. Київ, Україна*

Malashchuk N. S.

*Doctor of Philosophy,
Research Associate,
Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences
of Ukraine
Kyiv, Ukraine*

Малашчук Н. С.

*доктор філософії, наукова
співробітниця,
Інститут технічної теплофізики
Національної академії наук України
м. Київ, Україна*

Україна, як член ООН, приєдналася до глобального процесу забезпечення сталого розвитку, визначивши національні Цілі Сталого Розвитку (ЦСР), які слугуватимуть основою для інтеграції зусиль, спрямованих на забезпечення економічного зростання, соціальної справедливості та раціонального природокористування [1]. Одним із завдань ЦСР є забезпечення створення стійких систем виробництва продуктів харчування, насамперед за рахунок використання інноваційних технологій виробництва, розроблених на засадах підвищення їхньої енергоефективності [1]. В умовах сьогодення забезпечення доступності збалансованого харчування для населення України на рівні науково обґрунтованих норм є пріоритетом державної політики [1].

Одним із основних технологічних процесів в харчовій та переробній промисловості є сушіння нагрітим повітрям, під час якого відбувається видалення надлишкової вологи з матеріалу до рівня безпечного для зберігання. У висушеному продукті припиняється мікробне псування та мінімізується ферментативна активність, що подовжує термін зберігання. Проте, сушіння є енергоємним промисловим процесом, на який припадає від 12 до 20% від загального споживання енергії в промисловості розвинених країн. Для досягнення ЦСР важливим є формування енергетичної безпеки країни, що передбачає зокрема впровадження програм і заходів з підвищення енергозбереження та енергоефективності секторів економіки [1].

Враховуючи, що сушіння нагрітим повітрям є важливим з точки зору збереження властивостей і хімічного складу сировини та витрат енергії етапом, для створення сталих технологій перероблення рослинних матеріалів дослідження зневоднення сировини, спрямовані на підвищення енергоефективності процесу та забезпечення одержання продукту високої якості є актуальним науково-технічним завданням.

Для визначення закономірностей процесу сушіння термолабільних матеріалів та розроблення енергоефективних режимів зневоднення як об'єкти дослідження вибрані фрукти (яблука) та пряно-ароматичні трави (м'ята перцева). У зв'язку з тим, що тривала теплова дія негативно позначається на якості готового продукту, при розробленні режимів зневоднення фруктів та пряно-ароматичних трав основний акцент повинен робитися на використання невисоких температур і скорочення тривалості процесу. Для збереження цінних біологічно активних речовин сушіння необхідно здійснювати за температури, що не перевищує 40 °C для пряно-ароматичних трав і 60 °C для фруктів.

При вивченні технологічних властивостей матеріалів важливе значення має аналіз ізотерм адсорбції, що представляють функціональну залежність між відносною вологістю повітря і рівноважним вологовмістом матеріалу при постійних температурі і тиску. За

експериментально одержаними ізотерми адсорбції пари води для досліджуваних матеріалів визначені значення рівноважних вологовмістів в діапазоні температур 30...60 °С. Це дозволило встановити зв'язок між тепловологісними параметрами сушильного агента і висушеного матеріалу в процесі сушіння, а також одержати залежність парціального тиску пари води на поверхні матеріалу від вологовмісту і температури $p_m = f(u, t)$ в діапазоні $u = 0,04...0,9$ кг/кг с.м. і $t = 30...60$ °С.

Найпомітніший вплив вологовмісту сушильного агента на тривалість процесу виявляється при низькотемпературному сушінні: низька інтенсивність зневоднення, залежність ефективності роботи сушарки від тепловологісних параметрів атмосферного повітря. Аналіз залежностей парціального тиску пари води на поверхні матеріалу p_m для досліджуваних матеріалів показав, що у міру зменшення вологовмісту на поверхні матеріалу зменшується рушійна сила масообміну – масообмінний напор $\Delta p = p_m - p_{c.a.}$.

Єдиним шляхом інтенсифікації процесу низькотемпературного сушіння є збільшення масообмінного напору Δp шляхом примусового осушення сушильного агента. Для підтримки необхідної величини масообмінного напору сушіння доцільно проводити за режимами зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента. На першій стадії сушіння, достатній невеликий ступінь осушення. На другій стадії у міру зниження парціального тиску пари води над матеріалом відповідно збільшується ступінь осушення. На стадії досушування, основним фактором, що обумовлює енерговитрати, є тривалість процесу. Для збільшення швидкості сушіння необхідно максимально збільшити ступінь осушення сушильного агента.

В дослідженні [2] для визначення оптимальних за енерговитратами показників процесу сушіння з застосуванням теплонасосного циклу розроблений алгоритм розрахунку в $H-d$ діаграмі процесу зневоднення теплоносія. За розрахованими питомими енерговитратами при різних температурах сушіння та ступенях осушення теплоносія (рис. 1), визначені оптимальні тепловологісні параметри теплоносія та розроблені режими, що забезпечують інтенсифікацію масообміну та мінімальні енерговитрати в продовж всього процесу сушіння (табл. 1).

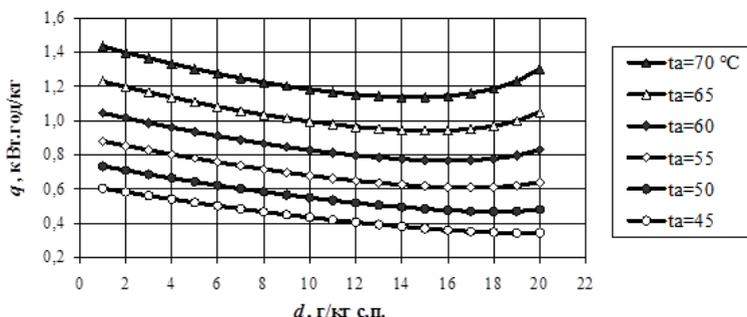


Рис. 1. Вплив температури сушіння на енерговитрати процесу видалення вологи

Відпрацьоване вологе повітря, що йде з сушарки, є ідеальним джерелом низькопотенційної енергії для теплового насоса конденсаційної сушарки. Інтеграція теплового насоса в цикл сушарки дозволяє реалізувати розроблені режими сушіння яблука та м'яти перцевої.

Таблиця 1

Режими сушіння яблука та м'яти при температурі сушильного агента 50 °C та 40 °C відповідно

Стадія	Ступінь осушення сушильного агента	d , г/кг с.п.	Δp , мм рт.ст. яблуко / м'ята	q , кВт·год/кг
I	невеликий ступінь осушення	20...25	58...63 / 25...30	0,4...0,6
II	збільшення ступеня осушення	15...20	45...54 / 20...25	0,6...1,0
III	максимально можливий ступінь осушення	< 15	33...42 / 12	до 1,5

Можливість примусового осушення повітря у випарнику теплового насоса дозволяє створити необхідні тепловологісні параметри сушильного агента незалежно від умов навколишнього середовища. Така здатність теплового насоса знижувати вологовміст сушильного агента під час низькотемпературного сушіння сприяє інтенсифікації вологовидалення за рахунок підвищення масообмінного напору між теплоносієм і матеріалом. Волога, що вилучається з матеріалу не виноситься сушильним агентом в навколишнє середовище, а конденсується на холодній поверхні випарника теплового насоса, при цьому

утилізується теплота конденсації, яка повертається на більш високому рівні в процес. Це дозволяє знизити енерговитрати на зневоднення в 2...3 рази в порівнянні з традиційним конвективним сушінням, підвищивши його енергоефективність.

Література:

1. Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна». URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

2. Snezhkin Y., Chalaev D., Dabizha N. Analysis of energy performance of heat pump drying. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017. Vol. 39. № 3. P. 47–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.07>.