

УДК 664.8.047

ІНТЕНСИВНІ СПОСОБИ СУШІННЯ ЯБЛУЧНИХ СЛАЙСІВ З КОНВЕКТИВНИМ ТА КОМБІНОВАНИМ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯМ

Снєжкін Ю.Ф.¹, академік НАН України, Пазюк В.М.², докт. техн. наук.,
Гусарова О.В.³, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057
email: ittf_ntps@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057
email: vadim_pazuk@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-1941>

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057
email: o.v.husarova@nas.gov.ua, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7622-9168>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1>

У статті досліджено процес сушіння яблучних слайсів до низької залишкової вологості 5% за різних режимів та способів зневоднення. Запропоновано енергоефективний ступеневий режим конвективного сушіння 80/60 °С та ступеневий комбінований режим з поєднанням ІЧ-випромінювання та конвективного нагріву ІЧ (100 Вт)+60 °С/60 °С. Енергоефективність розроблених режимів підтверджується скороченням тривалості процесу в 1.9 рази порівняно зі стаціонарним режимом за температури сушильного агента 60 °С. Одержано залежність для визначення загальної тривалості процесу сушіння слайсів комбінованим способом.

The article investigates the process of drying apple slices to a low residual moisture content of 5% under different modes and methods of dehydration. An energy-efficient stepwise convective drying mode of 80/60 °C and a stepwise combined mode with a combination of IR radiation and convective heating of IR (100 W)+60 °C/60 °C are proposed. The energy efficiency of the developed modes is confirmed by a 1.9-fold reduction in the process duration compared to the steady-state mode at a drying agent temperature of 60 °C. The dependence for determining the total duration of the slices drying process by the combined method was obtained.

Бібл. 15, рис. 9.

Ключові слова: яблучні слайси, конвективне сушіння, конвективно-інфрачервоне енергопідведення, ступеневі режими, комбіновані режими, енергоефективність.

τ – час, хв;

θ – температура, °С;

χ_i – відносні коефіцієнти сушіння;

B – відновлюваність зразка, %;

d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря;

E – інтенсивність інфрачервоного випромінювання, кВт/м²;

K_i – емпіричні коефіцієнти сушіння;

K_n – коефіцієнт набухання;

N – максимальна швидкість сушіння, %/хв;

V – швидкість руху сушильного агента, м/с;

W – відносна вологість сировини, %;

Rb – число (критерій) Ребіндера.

Індекси:

$_k$ – кінцевий;

$_{кр}$ – критичний;

$_z$ – загальний;

$_i$ – порядковий номер.

Вступ

Сушіння це масообмінний процес видалення води з матеріалу шляхом випаровування, завдяки якому досягається збільшення терміну зберігання сировини із зниженням транспортної ваги [1]. Яблука – поширений вид фруктів, який майже цілорічно присутній в нашому раціоні харчування. У їхньому складі міститься значна кількість вітамінів (С, В1, В2, Р, Е), марганець, калій, а також легкозасвоюване залізо. Хімічний склад яблук представлено на рис. 1.

Хімічний склад яблук залежить від помологічного сорту, умов та місця вирощування, ступеня зрілості, періоду збирання та зберігання. Особливістю хімічного складу яблук є те, що в складі розчинних вуглеводів, перш за все цукрів, найбільша частина представлена фруктозою, а сахарози досить мало.

Також їх гіпоалергенні властивості дозволяють вживати яблука майже всім, в тому числі й діабетикам [2].

Для сушіння рекомендується використовувати яблука пізніх сортів дозрівання середнього ступеня зрілості

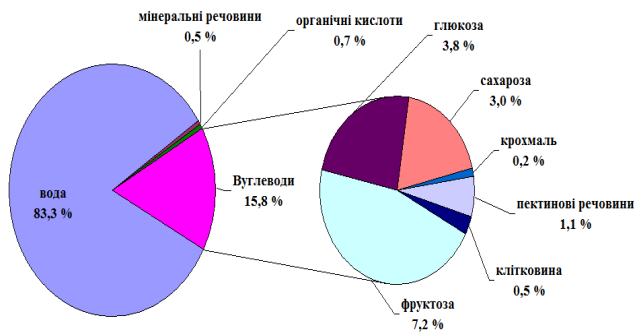


Рис. 1. Хімічний склад яблук (у % до загальної маси)

з великою кількістю ароматичних і смакових речовин. Для зручного та швидкого сушіння яблук, з можливістю надання їм необхідної форми, їх попередньо ріжуть на кружечки, пластинки, дольки або кубики. Такі яблучні шматочки різноманітної форми часто називають слайсами (від англ. *slice*) – тонкий зріз, шар, шматочок.

Як було показано раніше [3] для сушіння ба-жано використовувати яблука діаметром більше 50 мм. Для виготовлення більш подрібненого матеріалу можуть бути використані дрібні яблука, однак переробка плодів діаметром менше 30...35 мм недоцільна через збільшення відходів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для зневоднення яблук використовують конвективний спосіб сушіння за низьких температур теплоносія, що є енерговитратним і довготривалим процесом. Тому для інтенсифікації процесу розроблені інші методи сушіння, зокрема сушіння інфрачервоним випромінюванням, струмами високої частоти, ультразвуком тощо.

Одним з ефективних методів сушіння для скорочення тривалості процесу сушіння є підведення теплоти через інфрачервоне випромінювання. Як показано авторами [4] збільшення інтенсивності інфрачервоного випромінювання від $E=0.130$ до 0.341 Вт/см² сприяє скороченню часу зневоднення яблучних скибочок від 280 до 190 хв, позитивно впливає на відновлюваність сушеного продукту.

Авторами [5] проведено дослідження інноваційного устаткування для сушіння слайсів із фруктів та овочів за умов ІЧ-випромінювання. Визначено вплив потужності ІЧ-випромінювання на кінетику процесу сушіння фруктових і овочевих слайсів. Проведено порівняння експериментальних даних щодо сушіння слайсів за умов НВЧ і ІЧ-випромінювання.

Вплив інфрачервоного опромінення досить значний в процесі сушіння й іншої сировини. Авторами [6] на основі експериментальних досліджень зневоднення

зернового матеріалу встановлено, що при збільшенні потужності ІЧ-джерела від 400 до 500 Вт час сушіння тривалість сушіння зменшується з 9 до 7 хвилин (сушіння проведено з початкової вологості матеріалу 11% до 8.75%).

Відомий спосіб сушіння, відповідно до якого зневоднення яблук проводили поєднанням попередньої ІЧ-обробки та конвективного сушіння. Короткочасну ІЧ-обробку проводили при інтенсивності інфрачервоного випромінювання $E=20$ кВт/м² здійснювали протягом 90 та 120 с. При тривалості процесу 90 с відбувається прогрівання внутрішніх шарів сировини до температури 70 °С, а при тривалості 120 с – до 82 °С. Попередньою ІЧ-обробкою протягом 90 с видаляється до 15% вологи, а тривалість сушіння знижується на 23%, а при 120 с видаляється до 25% вологи зі зменшенням тривалості процесу на 62% порівняно з лише конвективним способом сушіння за температури теплоносія 60 °С. Попередня ІЧ-обробка знижує вміст вітаміну С в яблуках до 95%, але за рахунок зменшення тривалості сушіння, вміст вітаміну С становить 65...70%, що перевищує вміст вітаміну С під час сушіння конвективним способом на 15...20% [7].

Застосування такого способу сушіння не доцільне, так як відбувається перевищення гранично допустимої температури матеріалу, яка є визначальним параметром під час сушіння рослинної термолабільної сировини.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є інтенсифікація сушіння яблучних слайсів до низької залишкової вологості з мінімальними втратами біологічно-активних речовин.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити кінетичні закономірності сушіння яблучних слайсів конвективним та конвективно-інфрачервоним (комбінованим) способами;
- розробити інтенсивні режими зневоднення з використанням конвективного та комбінованого способу сушіння;
- розрахувати загальну тривалість процесу сушіння яблучних слайсів;
- оцінити відновлюваність та органолептичні показники сушеного продукту отриманого за різними методами сушіння.

Матеріали і методи досліджень

Дослідження процесу зневоднення яблук з метою вивчення основних закономірностей тепломасопере-сення проводили на експериментальному сушильному стенді.

Експериментальний стенд складається із системи ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції теплоносія, сушильних камер, системи контролю і підтримання температури теплоносія, автоматичного збору і обробки інформації про перебіг процесу зневоднення матеріалу [8].

Стенд обладнаний автоматизованою системою збору та обробки інформації, що включає комп'ютер, цифрові ваги AD-500 та спеціально розроблену автоматизовану програму, канал вимірювання температури, що складається з аналогово-цифрового перетворювача та інтерфейсу. Аналогові сигнали з термоелектричних датчиків перетворювались АЦП (*i-7018*) в цифрову форму та за допомогою інтерфейсу (*i-7520*) передавались на комп'ютер.

Експериментальні дослідження сушіння яблук проводились в наступній послідовності:

1. Вибір сорту яблук.

Вибраний сорт яблук «Джонаголд» має червоний колір та збалансований солодкий смак (врожай 2023 року, зібраний у Вінницькій області, Україна).

2. Підготовка яблук до сушіння.

Яблука мили проточною водою і нарізали на пластинки завтовшки 4...5 мм, шириною 8...10 мм та довжиною 60...65 мм з видаленням насіннєвої камери.

3. Сушіння нарізаних яблучних слайсів в один шар до низької залишкової вологості 5% за різних режимів та способів зневоднення.

4. За експериментальними даними будували криві кінетики сушіння $W = f(\tau)$, криві швидкості сушіння $dW/d\tau = f(W)$, отримані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння, а також температурні криві нагріву матеріалу $\theta = f(\tau)$.

5. З метою визначення якості отриманого продукту та перевірки правильності розроблених режимів зневоднення проведено дослідження по визначенню коефіцієнту набухання та відновлюваності за методикою, що наведена в публікаціях [9, 10].

Враховуючи, що збільшення тривалості сушіння негативно позначається на якості сушених продуктів із яблук, тому при розробленні режимів зневоднення контролювалась максимально допустима температура нагріву матеріалу та підвищення інтенсивності сушіння із скороченням три-валості процесу. Максимально допустима температура нагрівання яблук, як правило, не перевищує 60 °С.

Зневоднення яблучних слайсів проводили двома способами сушіння:

- конвективним – із застосування стаціонарних (60, 80 °С) та ступеневого (80/60 °С) режимів;

- комбінованим ступеневим інфрачервоно-конвективним режимом – ІЧ (100 Вт)+60 °С / 60 °С.

Ступеневе конвективне сушіння здійснювалось таким чином: на початку процесу температура теплоносія складала 80 °С, по мірі прогріву матеріалу до 55 °С, температуру теплоносія знижували до 60 °С, і підтримували на такому рівні до кінця процесу.

Ступеневе комбіноване інфрачервоно-конвективне сушіння складається з двох етапів: перший – комбіноване сушіння при ІЧ (100 Вт) + 60 °С, другий – конвективний при 60 °С. На першому етапі відбувається сушіння при поєднанні двох способів сушіння – ІЧ та конвективного, при досягненні матеріалом температури 59 °С – ІЧ-випромінювання вимикали і далі відбувалось лише конвективне зневоднення за температури 60 °С.

Результати та їх обговорення

1. Експериментальні дослідження кінетики сушіння яблучних слайсів

1.1. Інтенсифікація процесу сушіння яблучних слайсів за рахунок ступеневого конвективного зневоднення

Визначення тривалості сушіння слайсів з яблук проводилось за температур теплоносія 60, 80, 80/60 °С (рис. 2) [11].

Збільшення температури теплоносія від 60 до 80 °С (криві 1, 2) зменшує тривалість сушіння 2.38 рази. Сушіння проводилось від початкової вологості 84% до кінцевої 5%. Як бачимо з кривою 2', за температури теплоносія 80 °С, кінцева температура нагрівання матеріалу досягла 68.2 °С, що вище допустимої в 60 °С, тому температуру теплоносія потрібно знижувати.

Запропоновано застосовувати ступеневий режим сушіння 80/60 °С. Такий режим дозволяє інтенсифікувати процес за рахунок застосування на першому етапі, тривалість якого складає 50 хв, температури сушіння 80 °С, яка забезпечує інтенсивне відведення більшої частини вологи з матеріалу (криві 3, 3'). Потім, при досягненні матеріалом поточної вологості 18% та його прогрівання до 55 °С, температуру теплоносія знижували до 60 °С і підтримували на такому рівні протягом всього другого етапу сушіння до завершення процесу.

У даному випадку, тривалість сушіння збільшується до 100 хв порівняно з режимом сушіння 80 °С (криві 2, 3), але кінцева температура нагрівання в середині матеріалу не перевищує 51.7 °С, що менше на 16.5 °С (крива 2', 3'), що гарантує дотримання граничної температури сировини.

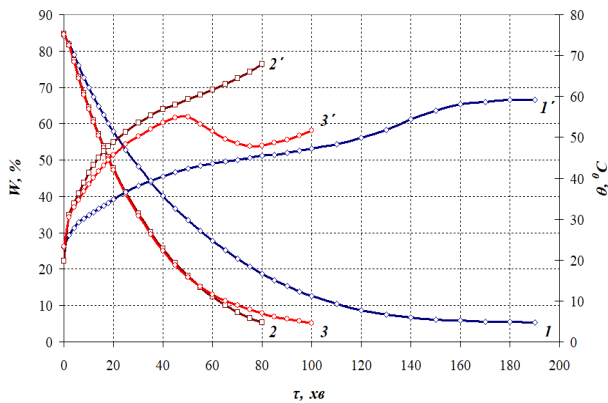


Рис. 2. Вплив температури теплоносія на кінетику процесу сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм в один шар, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1, 1' – 60°C ; 2, 2' – 80°C ; 3, 3' – $80/60^\circ\text{C}$

Порівняно з стаціонарним режимом зневоднення 60°C (крива 1) спостерігається скорочення тривалості процесу на 90 хв.

Застосування ступеневого режиму $80/60^\circ\text{C}$ дозволяє отримати високу якість висушених яблук та інтенсифікувати процес сушіння.

Для характеристики процесу сушіння побудовані криві швидкості сушіння яблучних слайсів (рис. 3) [11].

Процес сушіння проходить в періоді падаючої швидкості сушіння.

Як видно з рис. 3, в режимах сушіння 80 та $80/60^\circ\text{C}$ (криві 2, 3) значення максимальної швидкості складають 2.3 %/хв, що вище в 1.43 рази за режим сушіння 60°C (крива 1). Зменшення інтенсивності сушіння наприкінці процесу за ступеневого режиму $80/60^\circ\text{C}$ пов'язане із зниженням температури теплоносія до рівня максимально допустимої температури нагрівання сировини.

1.2. Інтенсифікація процесу сушіння яблучних слайсів ступеневим комбінованим інфрачервоно-конвективним способом (при ІЧ-випромінюванні $E = 3.8$ кВт/м²)

Як бачимо з рис. 4, застосування ступеневого комбінованого режиму сушіння ІЧ

$(100\text{ Вт}) + 60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$ порівняно з стаціонарним режимом 60°C (криві 1, 3) дозволяє зменшити тривалість процесу на 90 хв або в 1.9 рази [11]. Порівняння двох ступеневих, конвективного та комбінованого режимів (криві 2, 3) вказує, що тривалість сушіння однакова і складає 100 хв. Ці криві мають різний характер.

Температурні криві 1' – 3' описують характер протікання процесу сушіння яблучних слайсів (рис. 4).

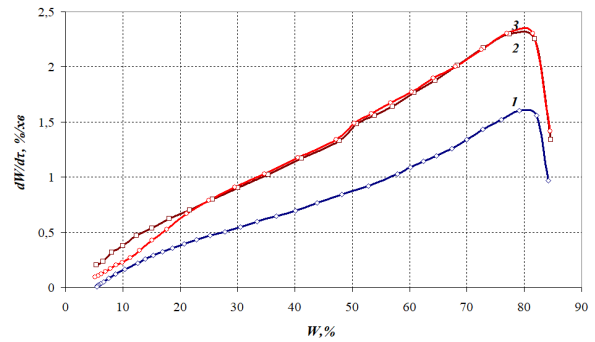


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1 – 60°C ; 2 – 80°C ; 3 – $80/60^\circ\text{C}$

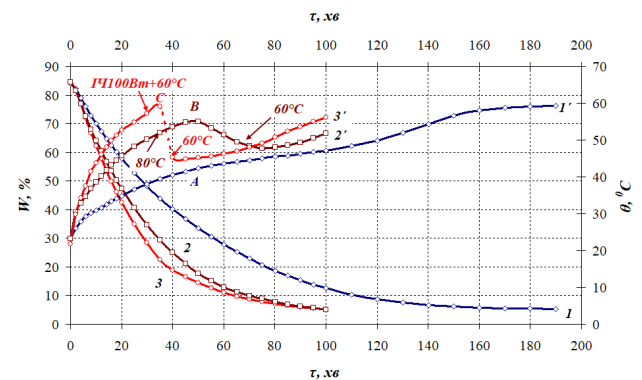


Рис. 4. Вплив режимів сушіння на кінетику процесу зневоднення яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1, 1' – 60°C ; 2, 2' – $80/60^\circ\text{C}$;
3, 3' – ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$
А, В, С – точки порівняння та зміни режимів сушіння

За температури теплоносія 60°C (крива 1') – процес сушіння йде повільно, з поступовим збільшенням температури матеріалу до 59.2°C та тривалим рівномірним видаленням вологи з нього.

Відмінність ступеневого комбінованого режиму сушіння ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$ від ступеневого конвективного режиму сушіння $80/60^\circ\text{C}$ полягає в тому, що прогрівання настає швидше, вже на 35 хвилині, до температури матеріалу 59°C (крива 3', точка С). Кінцева температура нагрівання матеріалу в комбінованому режимі вища за конвективний і досягає 56°C .

Інтенсивність процесу сушіння яблучних слайсів на рис. 5 оцінюється за значенням максимальної швидкості сушіння [11].

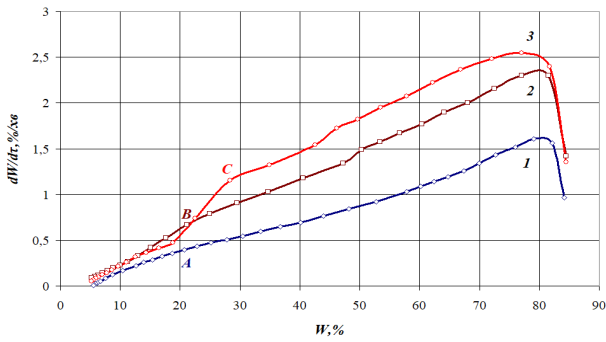


Рис. 5. Вплив режимів сушіння на швидкість зневоднення яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
 1 – 60 °C; 2 – 80/60 °C;
 3 – ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C

A, B, C – точки порівняння та зміни режимів сушіння

Так, комбінований режим сушіння ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C (крива 3) найбільш інтенсивний. Він дозволяє збільшити максимальну швидкість порівняно з режимом сушіння 60 °C – в 1.58 рази, а з ступеневим режимом 80/60 °C – в 1.1 рази.

При застосуванні ступеневого комбінованого інфрачервоно-конвективного режиму (крива 3, рис. 5) спостерігається зниження швидкості сушіння при досягненні матеріалом вологості 23% (точка С), що пов'язане з вимкненням ІЧ-випромінювання та різким зниженням температури матеріалу. За рахунок цього обидва ступеневі режими мають однакову тривалість сушіння.

2. Дослідження тепломасообміну під час сушіння яблучних слайсів

2.1. Дослідження кінетики процесу зневоднення яблучних слайсів

Для дослідження кінетики сушіння яблучних слайсів комбінованим інфрачервоно-конвективним способом представимо криву кінетики сушіння в напівлогарифмічних координатах $\lg W - (N \cdot \tau)$ на рис. 6 [12].

При математичному описі кінетики вологообміну під час сушіння в другому періоді повинні враховуватись емпіричні коефіцієнти (K_i), які обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти визначаються безпосередньо з досліду по сушінню.

Відносний коефіцієнт сушіння χ_i визначається лише формою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки.

Величини відносних коефіцієнтів сушіння яблучних пластинок в другому періоді визначаються за формулами (1 – 3) [11]:

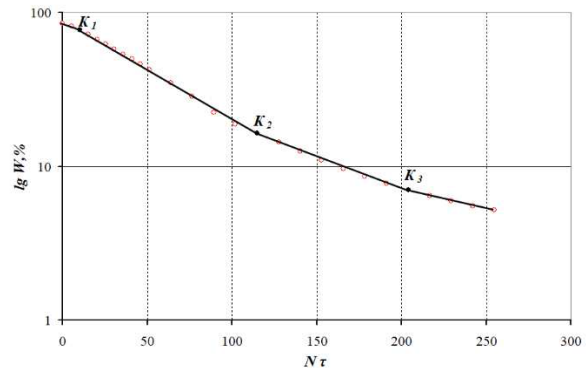


Рис. 6. Узагальнена крива кінетики сушіння яблучних пластинок розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, в координатах $\lg W - (N \cdot \tau)$

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K1} - \lg W_{K2}}{N \tau_1} = \frac{\lg 77 - \lg 16.49}{104.3}$$

$$\approx 0.0064 \quad (1)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K2} - \lg W_{K3}}{N \tau_2} = \frac{\lg 16.49 - \lg 7}{89}$$

$$\approx 0.0042 \quad (2)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K3} - \lg W_K}{N \tau_3} = \frac{\lg 7 - \lg 5.22}{50.8}$$

$$\approx 0.0024 \quad (3)$$

Коефіцієнти сушіння в другому періоді сушіння визначаються по залежностям (4 – 5):

$$K_1 = \chi_1 \cdot N = 0.0064 \cdot 2.54$$

$$\approx 0.0163 \text{ хв}^{-1} \quad (4)$$

$$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0.0042 \cdot 2.54$$

$$\approx 0.0107 \text{ хв}^{-1} \quad (5)$$

$$K_3 = \chi_3 \cdot N = 0.0024 \cdot 2.54$$

$$\approx 0.0061 \text{ хв}^{-1} \quad (6)$$

Загальна тривалість процесу визначається по залежності (7):

$$\tau_3 = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K1}}{W_{K2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K2}}{W_{K3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K3}}{W_K} \right) \quad (7)$$

Підставивши значення відносних коефіцієнтів сушіння χ_i та критичних вологостей W_{ki} отримуємо загальну тривалість процесу сушіння:

$$\tau_3 = \frac{1}{2.54} \left(\frac{1}{0.0064} \lg \frac{77}{16.69} + \frac{1}{0.0042} \lg \frac{16.69}{7} + \frac{1}{0.0024} \lg \frac{7}{5.22} \right) \approx 97 \text{ хв}$$

За експериментальними даними тривалість сушіння за комбінованого режиму становить 100 хв, тобто відхилення експериментального значення від теоретичного складає 3%.

2.2. Дослідження процесу тепломасообміну під час сушіння яблучних слайсів

Для опису процесу тепломасообміну під час сушіння застосовують число Ребіндера Rb . Число Ребіндера дорівнює відношенню витрат кількості теплоти на нагрівання матеріалу до кількості теплоти на випаровування з нього вологи за нескінченно малий проміжок часу [13]. Його ще називають критерієм оптимізації процесу сушіння.

Зміна числа Ребіндера для досліджуваних режимів сушіння зображена на рис. 7.

Аналіз зміни числа Rb від вологості матеріалу показує, що при режимі 60 °С (крива 1) до вологості матеріалу $W = 75\%$ відбувається прогрів сировини. У цей період більша частина теплоти витрачається на нагрів матеріалу, а не на випаровування вологи з нього. Далі крива 1 іде майже паралельно і дуже близько до лінії числа Rb з нульовим значенням. Це означає, що процес сушіння досить ефективний та більша частина теплоти витрачається на випаровування вологи, а не на прогрівання матеріалу. При вологості матеріалу

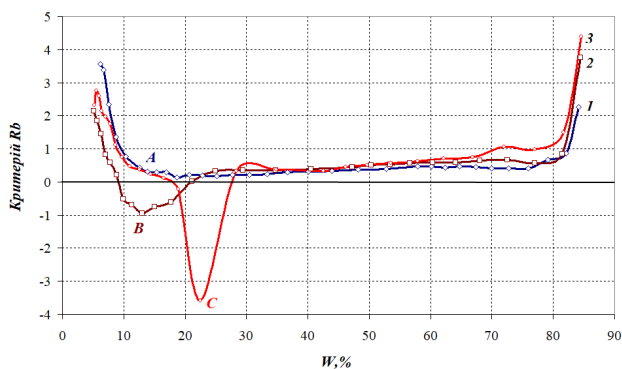


Рис. 7. Зміна числа Ребіндера під час сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.: 1 – 60 °С; 2 – 80/60 °С; 3 – ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С
A, B, C – точки порівняння та зміна режиму сушіння

$W = 14\%$ (точка A), крива 1 починає різко зростати, що вказує на те, що все більше і більше теплоти витрачається на нагрівання матеріалу, ніж на випаровування вологи з нього. Це пов'язано з тим, що починається випаровування адсорбційно зв'язаної з матеріалом вологи, кількість якої не значна.

Число Rb для ступеневого режиму 80/60 °С (крива 2, рисунок 7) проходить ті ж періоди, що і при режимі 60 °С, але процес зневоднення більш інтенсивний, тому критичні точки інші. Так, прогрів закінчується приблизно при тій же вологості матеріалу (близько $W = 80\%$). Основне ефективне зневоднення матеріалу подібне до режиму 60 °С. Але при вологості матеріалу $W = 22\%$, коли відбувається перехід на режим 60 °С, точка B, значення числа Rb ще більше зменшується. Це закономірно, бо температура теплоносія знизилась, що вказує на більшу енергоефективність режиму. При вологості менше 10% число Rb починає зростати, що, як було зазначено вище, пов'язано з видаленням міцно зв'язаної з матеріалом адсорбційної вологи. Це також підтверджується характером температурної кривої 2' та кривої кінетики сушіння 2 на рисунку 4.

Залежність числа Rb при ступеновому комбінованому режимі ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С аналогічна попереднім режимам, але як видно з рисунку 7, крива 3, процес зневоднення найбільш ефективний. Прогрів матеріалу аналогічний режимам 60 °С та 80/60 °С та закінчується при вологості матеріалу близько $W = 80\%$. До досягнення матеріалом вологості $W = 30\%$ режим також подібний до вище описаного. Але при вологості $W \approx 30 \dots 35\%$, коли вимикається ІЧ-нагрів (крива 3, рисунок 4), спостерігається значно більше, ніж при режимі 80/60 °С, зменшення числа Rb (до мінус 3,8, точка C, крива 3, рисунок 7), що вказує на більш суттєву енергоефективність процесу зневоднення. Лише при вологості матеріалу близько $W = 10\%$, коли видалається адсорбційно зв'язана з матеріалом волога, витрата теплоти на нагрівання матеріалу різко збільшується.

Характер кривих $Rb = f(W)$ доводить доцільність та ефективність використання розроблених ступених режимів зневоднення 80/60 °С та комбінованого ІЧ 100 Вт) + 60 °С / 60 °С.

3. Дослідження якісних характеристик яблучних слайсів

Властивість до набухання – один із критеріїв якості сушеної продукції.

Перед розрахунком відновлюваності визначали коефіцієнт набухання (Кн), який показує відносне збільшення маси продукту після набухання та визначає

здатність до відновлювання початкових властивостей матеріалу під час зневоднення. Динаміку зміни коефіцієнта набухання K_n від режиму сушіння представлено на рис. 8 [11].

Використання ступеневих режимів збільшують коефіцієнт набухання до 4.2...4.22, тобто зберігається здатність до відновлення властивостей після сушіння.

Відповідно до [14] відновлюваність матеріалу є більш показовою величиною, яка безпосередньо показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближається до вихідної, яка приймається за 100%.

Найбільше значення відновлюваності спостерігається для ступеневих режимів сушіння і складає 78...80% (рис. 9) [11].

Органолептичні показники висушених слайсів, одержаних за режимом зневоднення 80/60 °С та комбінованим ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С, були наступними: збалансований смак, природній аромат та світло-кремовий колір притаманний вихідній сировині.

Яблучні слайси одержані за стаціонарного режиму 60 °С мали менш виражений аромат свіжих яблук та набули жовтуватого забарвлення. Це пояснюється тривалим процесом зневоднення, що призводить до реакцій ферментативного потемніння зразків та руйнування деяких біологічно-активних речовин наявних у вихідній сировині.

Висновки

Узагальнюючи результати досліджень, можна зробити висновок, що температура теплоносія 80 °С забезпечує незначну тривалість процесу зневоднення, але органолептичні показники готового продукту незадовільні.

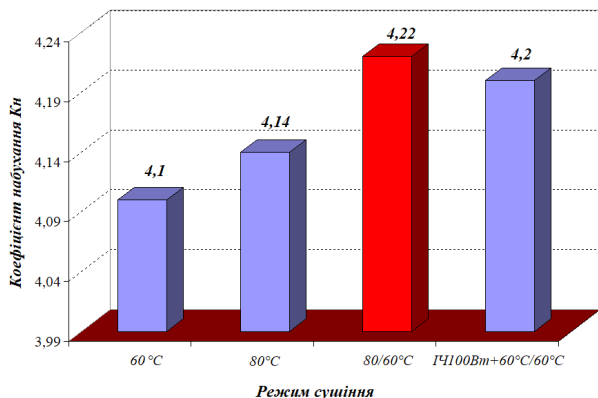


Рис. 8. Динаміка зміни коефіцієнту набухання K_n висушених яблучних слайсів розмірами 5×10×65 мм за різних режимів сушіння, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.

Сушіння за температури 60 °С призводить до збільшення часу зневоднення, і як наслідок, до збільшення енерговитрат та погіршення органолептичних характеристик та відновлюваності.

Рекомендовано процес зневоднення слайсів проводити за розробленими ступеневими режимами сушіння: конвективного 80/60 °С та комбінованого інфрачервоно-конвективного ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С.

На підставі досліджень кінетики водообміну при комбінованому конвективно-інфрачервоному режимі сушіння яблучних слайсів отримано формулу для розрахунку загальної тривалості процесу. Розбіжність між експериментальним та теоретичним значеннями тривалості сушіння не перевищує 3%.

Аналіз побудованих залежностей числа Ребіндера підтверджує енергоефективність рекомендованих режимів сушіння яблучних слайсів.

Одержаний продукт при розроблених ступеневих режимах сушіння має високу відновлюваність (78...80%) та органолептичні показники: збалансований смак, природній аромат та світло-кремовий колір притаманний вихідній сировині.

Повного відновлення висушених яблучних слайсів не спостерігається, через те, що під час сушіння відбувається усадка матеріалу, деформація структури паренхімних тканин, стискання вільних міжклітинних просторів по яким всмоктується вода. Через тепловий вплив відбувається необоротна денатурація речовин, які у нормальному стані зв'язують воду та набухають [14, 15].

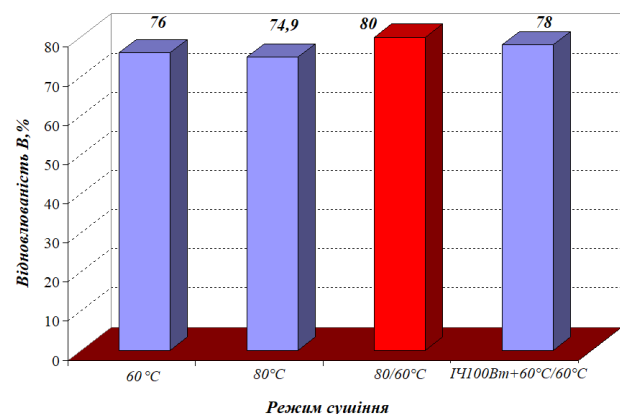


Рис. 9. Динаміка зміни відновлюваності B висушених яблучних пластинок з розмірами 5×10×65 мм за різних режимів сушіння, $V = 1.5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hany S. EL-Mesery, Ahmed I. EL-Seesy, Zicheng Hu, Yang Li. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 157. – 112070. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>.
2. Campeanu G., Neata G., Darjanschi G. Chemical Composition of the Fruits of Several Apple Cultivars Growth as Biological Crop // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. – 2009. – Vol. 37 (2). – P. 161 – 164. <https://doi.org/10.15835/nbha3723465>.
3. Бессараб О.С., Шутюк В.В. Технологія сушіння плодів та овочів. Київ: НУХТ. – 2002. – 84с.
4. Hany S. El-Mesery, Kwami Ashiagbor, Zi-cheng Hu, W.G. Alshaer, A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 52. – 103676. ISSN 226. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>.
5. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovy, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko, I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 5. – 11 (101). – p. 24 – 32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_5%2811%29_4
6. Bandura V., Kalinichenko, R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4. – Iss. 8 (94). – p. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>.
7. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. - Київ: Сік Груп Україна, 2018. – 228 с.
8. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying // *INMATEH - Agricultural Engineering*. – 2018. – Vol. 56. – No 3. – p. 39–48.
9. Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices // *Journal of Chemistry*. – 2014. – Vol. 2014. – Article ID 453175. – p. 1 – 8. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>.
10. Гусарова О.В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук: дис...канд. техн. наук.: 05.14.06 // Київ: ІТФ НАН України. – 2020. – 241 с.
11. Paziuk V., Husarova O., Bandura V., Fial-kovska L. Intensification of apple drying using convective and combined methods of dehydration // *INMATEH - Agricultural Engineering*. – Vol. 72, – No. 1. – 2024. – p. 173–182. <https://doi.org/10.35633/inmateh-72-16>
12. Paziuk V.M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O.A., Polievoda Yu. Special aspects of soybean drying with high seedling vigor // *University Pjstehnica of Buharest Scientific Bulletin. Series D*. – Vol. 83. – Iss. 2. – 2021. – p. 327–336.
13. Пазюк В.М., Гусарова О.В. Особливості сушіння яблучних слайсів при конвективному та конвективно-інфрачервоному енергопідведенні // Колективна монографія: Відповідальне виробництво та споживання: реалізація в нових поколіннях харчової продукції.– Riga: Publishing House “Baltija Publishing”, 2024. – p. 70–89. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-4>
14. Husarova O., Shapar R., Sorokova N. Intensification of heat and mass transfer during the convective drying of apple to low final moisture // *Theoretical and practical aspects of the development of the European Research Area: collective monograph / edited by authors*. 4th ed. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2020. – pp. 191–211. ISBN: 978-9934-588-53-2. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2>
15. Гусарова О.В. Вплив видів бланшування яблук на процес зневоднення під час виробництва чипсів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2018. – № 1 (27).– С. 147–156. <http://doi:10.5281/zenodo.1306519>.

INTENSIVE DRYING METHODS FOR APPLE SLICES WITH CONVECTION AND COMBINED ENERGY SUPPLY

Sniezhkin Yu.F.¹, Paziuk V.M.², Husarova O.V.³

¹*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>, email: itf_ntps@ukr.net*

²*Doctor of Technical Sciences, Docent, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-1941>, email: vadim_pazuk@ukr.net*

³*PhD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteyskyi Ave, 37, Kyiv, 03056, Ukraine*

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7622-9168>, email: o.v.husarova@nas.gov.ua

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1>

Drying is a mass-exchange process of removing moisture from a material by evaporation, which results in an increase in the shelf life of raw materials while reducing transport weight. Apples are a common type of fruit that is present in our diet almost all year round. They contain a significant amount of vitamins (C, B1, B2, P, E), manganese, potassium, and easily digestible iron. Apples are hypoallergenic and can be consumed by almost everyone.

The purpose of the work is to intensify the drying of apple slices to low residual moisture without loss of biologically active substances.

Research methods. The study of the kinetics of the slices drying process was performed on an experimental convective stand with a system of automatic recording and processing of information at a drying agent temperature of 60, 80, 80/60 °C and a stepwise combined mode with a combination of IR radiation and convective heating of IR (100 W)+60 °C/60 °C, speed 1.5 m/s, moisture content 10 g/kg dry air.

Results and conclusions. Summarising the re-search results, it can be concluded that the temperature of the drying

agent at 80 °C ensures a short duration of the dehydration process, but the organoleptic characteristics of the finished product are unsatisfactory.

Drying at a temperature of 60 °C leads to an increase in dehydration time, and as a result, to an increase in energy consumption and a deterioration in organoleptic characteristics and recoverability.

It is recommended that the dehydration process of slices be carried out according to the developed stepwise drying modes: convective 80/60 °C and combined infrared-convective IR (100 W) + 60 °C / 60 °C.

Based on the study of the kinetics of moisture exchange in the combined convective-infrared mode of drying apple slices, a formula for calculating the total duration of the process was obtained. The difference between the experimental and theoretical values of the drying time does not exceed 3%.

The analysis of the constructed dependences of the Rebinder's number confirms the energy efficiency of the recommended modes of drying apple slices.

The resulting product under the developed stepwise drying regimes has high recoverability (78...80%) and organoleptic characteristics: balanced taste, natural aroma, and light cream colour inherent in the raw material.

References 15, figures 9.

Key words: apple slices, convective drying, convective-infrared energy supply, step modes, combined modes, energy efficiency.

1. Hany S. *EL-Mesery, Ahmed I. EL-Seesy, Zi-cheng Hu, Yang Li.* Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2022. Vol. 157. 112070. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>

2. *Campeanu G., Neata G., Darjanschi G.* Chemical Composition of the Fruits of Several Apple Cultivars Growth as Biological Crop // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 2009. Vol. 37 (2). P. 161-164. <https://doi.org/10.15835/nbha3723465>

3. *Bessarab O.S, Shutiuk V.V.* Tekhnolohiia su-shinnia plodiv ta ovochiv [Technology of drying fruits and vegetables]. Kyiv: NUKhT. 2002. 84 p. (in Ukr).

4. *Hany S. El-Mesery, Kwami Ashiagbor, Zi-cheng Hu, W.G. Alshaer,* A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes // *Case Studies in Thermal Engineering.* 2023. Vol. 52. 103676. ISSN 226. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>.

5. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovyj, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko, I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 5. 11 (101). p. 24 – 32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_5%2811%29_4
6. Bandura V., Kalinichenko, R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. Iss. 8 (94). p. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
7. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. Teplomasoob-minni tekhnologii pererobky pektynovmisnoi syro-vyny: monohrafiia [Heat and mass transfer technologies for processing pitch-containing raw materials]. NAN Ukrainy, In-t tekhnichnoi teplofizyky. Kyiv: SIK HRUP Ukraina, 2018. 228 p. ISBN 978-617-7457-69-4. (in Ukr).
8. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying // INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. V. 56. No 3. p. 39–48
9. Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices // Journal of Chemistry. 2014. Vol. 2014. Article ID 453175. p. 1 – 8. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>.
10. Husarova O.V. Intensyfikatsiia teplomaso-perenosu pid chas oderzhannia chypsiv z yabluk: dys...kand. tekhn. nauk.: 05.14.06. [Intensification of heat and mass transfer during the production of apple chips: PhD thesis: 05.14.06] Kyiv: ITTF NAN Ukrainy. 2020. 241 c. (in Ukr).
11. Paziuk V., Husarova O., Bandura V., Fial-kovska L. Intensification of apple drying using convective and combined methods of dehydration // INMATEH - Agricultural Engineering. Vol. 72, No. 1. 2024. p. 173–182/ <https://doi.org/10.35633/inmateh-72-16>
12. Paziuk V.M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O.A., Polievoda Yu. Special aspects of soybean drying with high seedling vigor // University Pjlstehnica of Buharest Scientific Bulletin. Series D. Vol. 83. Iss. 2. 2021. p. 327–336.
13. Paziuk V.M., Husarova O.V. Osoblyvosti sushinnia yabluchnykh slaisiv pry konvektyvnomu ta konvektyvno-infrachervonomu enerhopidvedenni [Features of drying apple slices with convective and convective-infrared energy supply] // Kolektyvna monohrafiia: Vidpovidalne vyrobny-tstvo ta spozhyvannia: realizatsiia v novykh pokolin-niakh kharchovoi produktsii. Riga: Publishing House “Baltija Publishing”, 2024. p. 70–89. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-4> (in Ukr).
14. Husarova O., Shapar R., Sorokova N. Intensification of heat and mass transfer during the convective drying of apple to low final moisture // Theoretical and practical aspects of the development of the European Research Area: collective monograph / edited by authors. 4th ed. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2020. pp. 191–211. ISBN: 978-9934-588-53-2. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2>
15. Husarova O.V. Vplyv vydiv blanshuvannia yabluk na protses znevodnennia pid chas vyrobnytstva chypsiv [Influence of apple blanching types on the dehydration process during the production of chips] // Prohresyvni tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vy-robnystv restorannoho hospodarstva i torhivli. 2018. № 1 (27). P. 147–156. <http://doi:10.5281/zenodo.1306519> (in Ukr).

Отримано 29.10.2024

Received 29.10.2024

Прийнято до друку 14.11.2024

Accepted for publication 14.11.2024