
ОСОБЛИВОСТІ СУШІННЯ ЯБЛУЧНИХ СЛАЙСІВ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ ТА КОНВЕКТИВНО- ІНФРАЧЕРВОНОМУ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННІ

Пазюк В. М., Гусарова О. В.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-4>

ВСТУП

Сушіння є добре відомою процедурою видалення вологи з матеріалу, збільшення терміну зберігання із зниженням транспортної ваги ¹. Яблука – найбільш поширений вид фруктів, який цілорічно присутній в нашому раціоні харчування. У своєму складі вони містять велику кількість вітамінів, таких як С, В₁, В₂, Р, Е, а також марганець, калій і легкозасвоюване залізо. Яблука гіпоалергенні і їх можна вживати майже всім ².

Для сушіння придатні яблука середнього ступеня зрілості 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. Як було показано раніше ³ для сушіння бажано 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.

1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для зневоднення яблук використовують конвективний спосіб сушіння при низьких температурах теплоносія, що є енерговитратним і довготривалим процесом. Тому для інтенсифікації процесу розроблені

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. 37 (2). P. 161 – 164. <https://doi.org/10.15835/nbha3723465>

³ Бессараб О.С., Шупюк В.В. Технологія сушіння плодів та овочів. Київ: НУХТ. 2002. 84 с.

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. Розроблено експериментальний стенд і методику досліджень. Запропоновано структуру рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі. Базу експериментальних даних узагальнено в рівнянні в числах подібності. Рівняння надає можливість розраховувати коефіцієнт масовіддачі з помилкою в межах $\pm 15\%$. 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%). Визначено, що критерій Ребіндера зменшується (вологотеплова характеристика матеріалу) від 0,04 до 0,01.

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.

⁴ 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>

⁵ Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovyi, 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. 8 (94), p. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>

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 при температурі 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 при сушінні конвективним способом на 15–20% ⁷.

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

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є інтенсифікація сушіння яблучних слайсів до низької залишкової вологості без втрати біологічно-активних речовин.

Для досягнення мети необхідно вирішити 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;
- визначити критерій оптимізації процесу сушіння;
- оцінити відновлюваність та органолептичні показники сушеного продукту отриманого за різними методами сушіння.

2. Матеріали і методи досліджень

Дослідження процесу зневоднення яблук з метою вивчення основних закономірностей тепломасоперенесення проводили на експериментальному сушильному стенді, принципова схема якого зображена на рис. 1⁸.

⁷Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. – Київ: Сік Груп Україна, 2018. 228 с.

⁸Paziuk 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.

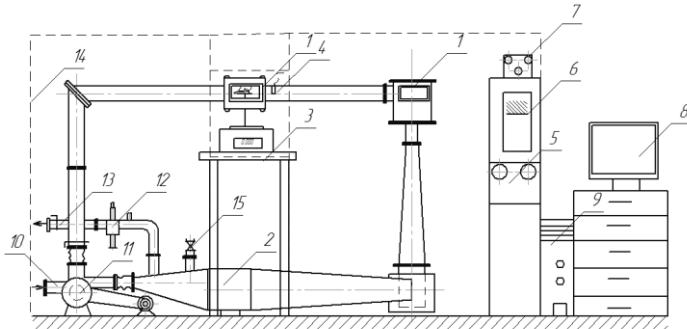


Рис. 1. Схема експериментального сушильного стану для вивчення тепломасообмінних процесів при зневодненні яблук:
1 – сушильні камери; 2 – ділянка теплової підготовки повітря;
3 – ваги з підставкою; 4 – термометр опору;
5 – щит керування; 6 – потенціометр;
7 – регулятор температури повітря; 8 – монітор; 9 – системний блок робочої станції;
10 – патрубок для змішування теплоносія з навколишнім повітрям; 11 – вентилятор; 12 – психрометр;
13 – патрубок викиду повітря для наступного змішування;
14 – теплоізоляційний каркас; 15 – патрубок підведення пари з голчатим вентилям

Експериментальний стенд складається із системи ізованих 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.

Дільниця теплової підготовки повітря (2) виконана у вигляді прямокутного короба, в якому розміщений трьохсекційний електричний підігрівач потужністю 10 кВт. Для точної підтримки заданої температури калорифер підключений до автоматичної системи регулювання, та термометрів опору ТСМ-50 (4). Вона дозволяє підтримувати температуру теплоносія в автоматичному режимі з точністю $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Рух теплоносія відбувається за допомогою відцентрового вентилятора (11) середнього тиску. Зміна швидкості руху теплоносія досягається регулюванням частоти обертання вентилятора (11) на щиті керування (5). Співвідношення між відпрацьованим та свіжим повітрям можна регулювати за допомогою шиберів на патрубках (10) та (13).

Швидкість повітря в сушильних камерах вимірювали за допомогою чашкового анемометра МС-13.

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.

Яблукамили проточною водою і нарізали на пластинки завтовшки 4...5 мм, шириною 8...10 мм та довжиною 60...65 мм з видаленням насіння.

3. Сушіння нарізаних яблучних слайсів до низької залишкової вологості 5% при різних режимах та способах 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 і підвищення інтенсивності сушіння із скороченням тривалості процесу.

⁹ Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices. Journal of Chemistry. Vol. 2014. Article ID 453175. 2014. 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: ІТТФ НАН України. 2020. 241 с.

Максимально допустима температура нагрівання яблук, як правило, не перевищує 60 °С та визначається ¹¹:

- 1) термочутливістю білкового комплексу;
- 2) термічним розкладанням цукрів, що супроводжується утворенням темнозабарвлених речовин;
- 3) реакціями не ферментативного потемніння при взаємодії цукрів з амінокислотами.

Зневоднення яблучних слайсів проводили двома способами сушіння:
– конвективним – із застосування стаціонарних (незмінних за весь час сушіння) (60, 80 °С) та ступеневого (зміна температури під час сушіння)

(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 при температурі 60 °С.

3. Експериментальні дослідження кінетики сушіння яблучних слайсів

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

Визначення тривалості сушіння слайсів з яблук проводилось при температурах теплоносія 60, 80, 80/60 °С (рис. 2).

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 кривої 2', при температурі теплоносія 80 °С, кінцева температура нагрівання матеріалу досягнула 68,2 °С, що вище допустимої в 60 °С, тому температуру теплоносія потрібно знижувати.

¹¹ Дабіжа Н. О. Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту: дис....канд. техн. наук: 05.14.06. Київ: ІТТФ НАН України. 2013. 208 с

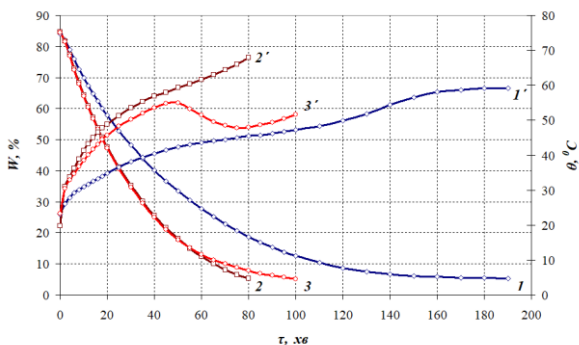


Рис. 2. Вплив температури теплоносія на кінетику процесу сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.: 1, 1' – 60 °С; 2, 2' – 80 °С; 3, 3' – $80/60$ °С

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.

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

Застосування ступеневого режиму $80/60$ °С дозволяє зберегти біологічно-активні речовини у висушених яблучних слайсів та інтенсифікувати процес сушіння.

Для характеристики процесу сушіння побудовані криві швидкості сушіння яблучних слайсів (рис. 3). Процес сушіння проходить в періоді падаючої швидкості сушіння.

Як видно з рис. 3, в режимах сушіння 80 та $80/60$ °С (криві 2, 3) значення максимальної швидкості складають $2,3$ %/хв, що вище в $1,43$ рази за режим сушіння 60 °С (крива 1). Зменшення інтенсивності сушіння наприкінці процесу при ступеневому режимі $80/60$ °С пов'язане

із зниженням температури теплоносія до рівня максимально допустимої температури нагрівання сировини.

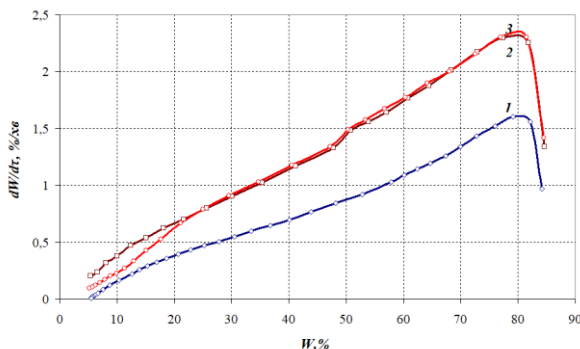
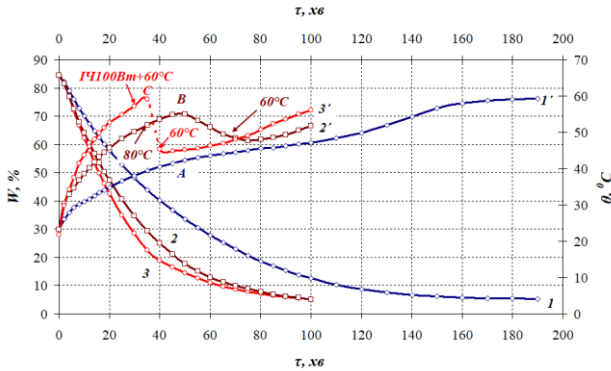


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.: 1 – 60°C ; 2 – 80°C ; 3 – $80/60^\circ\text{C}$

3.2. 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 Вт) + 60°C / 60°C порівняно з стаціонарним режимом 60°C (криві 1, 3) дозволяє зменшити тривалість процесу на 90 хв або в $1,9$ рази. Порівняння двох ступеневих, конвективного та комбінованого режимів (криві 2, 3) вказують, що тривалість сушіння однакова і складає 100 хв. Ці криві мають різний характер і для аналізу інтенсивності сушіння яблучних слайсів потрібно провести додатковий аналіз, який буде наведений нижче і показаний на рис. 5 – 7.

Температурні криві 1' – 3' описують характер протікання процесу сушіння яблучних слайсів (рис. 4). При температурі теплоносія 60°C (крива 1') – процес сушіння йде повільно, з поступовим збільшенням температури матеріалу до $59,2^\circ\text{C}$ та тривалим рівномірним видаленням вологи з матеріалу.



**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) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$
A, B, C – точки порівняння та зміни режимів сушіння**

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.

Так, комбінований режим сушіння ІЧ (100 Вт) + $60^\circ\text{C} / 60^\circ\text{C}$ (крива 3) найбільш інтенсивний. Він дозволяє збільшити максимальну швидкість порівняно з режимом сушіння 60°C – в 1,58 рази, а з ступеним режимом $80/60^\circ\text{C}$ – 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.

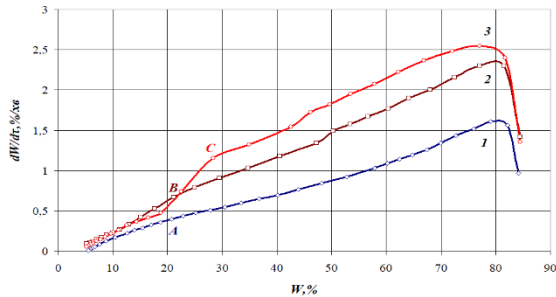


Рис. 5. Вплив режимів сушіння на швидкість зневоднення яблучних слайсів розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.: 1 – 60 °C; 2 – $80/60$ °C; 3 – ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C, A, B, C – точки порівняння та зміни режимів сушіння

Провівши аналіз експериментальних даних та узагальнивши результати досліджень, нами вперше запропоновано спосіб визначення інтенсивності сушіння за значенням середньої вологовіддачі та середньої температури прогрівання матеріалу за хвилину, на першому етапі сушіння (при ступеневих режимах) та за весь час сушіння (рис. 6, 7).

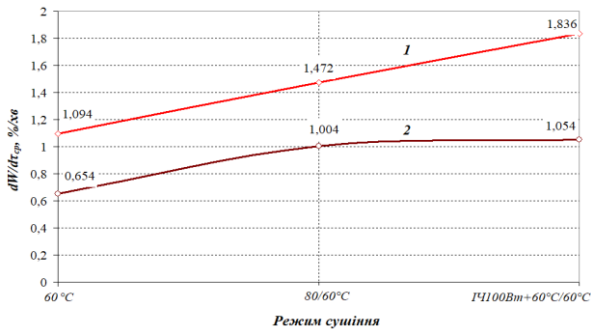


Рис. 6. Вплив режимів сушіння на середню інтенсивність видалення вологи з яблучних слайсів із розмірами: $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.: 1 – етап сушіння; 2 – весь процес

З рис. 6 видно, що найбільша середня інтенсивність видалення вологи при сушінні яблучних слайсів відбувається в ступеневому комбінованому режимі ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C: на першому етапі – $1,836$ %/хв (крива 1), за весь процес – $1,054$ %/хв (крива 2). Середня інтенсивність видалення вологи за весь процес в комбінованому режимі

сушіння вища в 1,61 рази порівняно з режимом сушіння 60 °С та в 1,05 разів при застосуванні ступеневого режиму 80/60 °С.

На рис. 7 представлено криві середньої інтенсивності прогрівання яблучних слайсів.

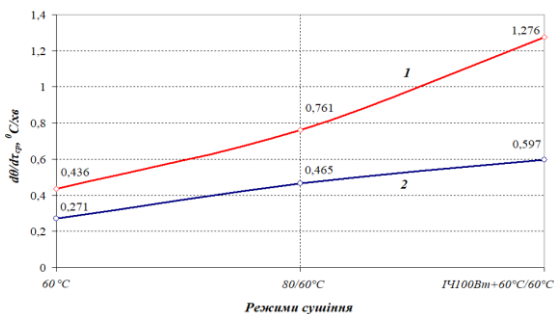


Рис. 7. Вплив режимів сушіння на середню інтенсивність прогрівання слайсів розмірами 5×10×65 мм, V= 1,5 м/с, d = 10 г/кг с.п.: 1 – етап сушіння; 2 – весь процес

Характер кривих вказує на перевагу застосування комбінованого способу сушіння, так як має більшу інтенсивність прогрівання пластинок у характерних точках на різних етапах та процесу в цілому. На першому етапі середня температура прогрівання матеріалу складає 1,276 °С/хв, а за весь процес 0,597 °С/хв. Прогрівання матеріалу при ступеновому комбінованому режимі відбувається майже в 3 рази швидше за режим сушіння 60 °С на першому етапі і в 2,2 рази за весь процес.

Інтенсивність прогрівання матеріалу при комбінованому режимі сушіння на першому етапі у 1,68 разів вища порівняно з ступеним конвективним (крива 1), що також впливає на загальну інтенсивність прогрівання матеріалу за весь процес.

4. Дослідження тепломасообміну при сушінні яблучних слайсів

4.1. Дослідження кінетики процесу зневоднення яблучних слайсів, визначення тривалості процесу сушіння

Для дослідження кінетики сушіння яблучних слайсів комбінованим інфрачервоно-конвективним способом представимо криву кінетики сушіння в напівлогарифмічних координатах $\lg W - (N \cdot \tau)$ на рис. 8 ¹².

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.

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

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

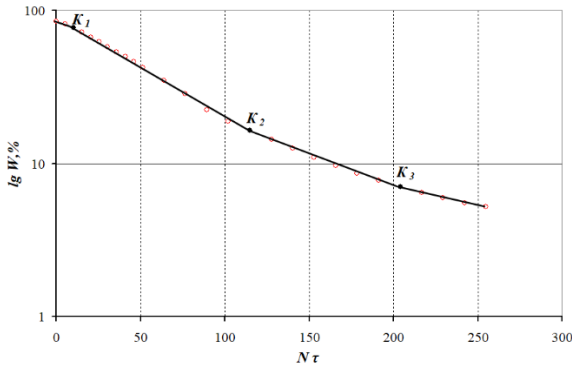


Рис. 8. Крива кінетики сушіння яблучних пластинок розмірами $5 \times 10 \times 65$ мм, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п. в координатах $\lg W - (N\tau)$

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

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K_1} - \lg W_{K_2}}{N\tau_1} = \frac{\lg 77 - \lg 16,49}{104,3} \approx 0,0064 \quad (1)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K_2} - \lg W_{K_3}}{N\tau_2} = \frac{\lg 16,49 - \lg 7}{89} \approx 0,0042 \quad (2)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K_3} - \lg W_K}{N\tau_2} = \frac{\lg 7 - \lg 5,22}{50,8} \approx 0,0024 \quad (3)$$

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):

$$\tau_T = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3}}{W_K} \right) \quad (7)$$

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

$$\tau_T = \frac{1}{2,54} \left(\frac{1}{0,0064} \lg \frac{77}{16,49} + \frac{1}{0,0042} \lg \frac{16,49}{7} + \frac{1}{0,0024} \lg \frac{7}{5,22} \right) \approx 97 \text{ хв}$$

За експериментальними даними тривалість сушіння при комбінованому режимі становить 100 хв, тобто відхилення експериментального значення від теоретичного складає 3%.

4.2. Дослідження процесу тепломасообміну при сушінні яблучних слайсів, визначення числа Ребіндера

Для опису процесу тепломасообміну при сушінні яблучних пластинок застосуємо число Ребіндера. Число Ребіндера дорівнює відношенню витрат кількості теплоти на нагрівання матеріалу до кількості теплоти на випаровування з нього вологи за нескінченно малий проміжок часу. Його ще називають критерієм оптимізації процесу сушіння.

$$Rb = b \frac{c}{r} \quad (8)$$

де b – температурний коефіцієнт сушіння; c – питома теплоємність матеріалу, кДж/кг К; r – питома теплота випаровування вологи, кДж/кг.

Температурний коефіцієнт сушіння b представляє собою похідну середньої температури матеріалу θ від вологості матеріалу W :

$$b = \frac{d\bar{\theta}}{dW} \quad (9)$$

Аналіз числа Ребіндера при сушінні яблучних пластинок, при досліджених режимах зневоднення, показує, що процес тепломасообміну на початку неефективний, більшість енергії витрачається на нагрівання матеріалу, а не на випаровування вологи з нього (рис. 9).

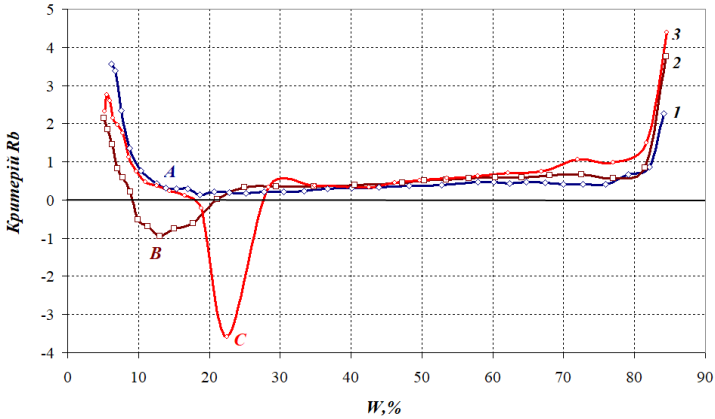


Рис. 9. Вплив режиму сушіння на зміну числа Ребіндера при сушінні яблучних слайсів розмірами 5×10×65 мм, $V=1,5$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1 – 60 °C; 2 – 80/60 °C; 3 – ІЧ (100 Вт) + 60 °C / 60 °C, A, B, C – точки порівняння та зміну режиму сушіння

Процес тепломасообміну для кожного режиму сушіння розглянемо окремо, так як вони мають свої особливості.

Для режиму сушіння 60 °C (крива 1) – на початку процесу відбувається прогрівання матеріалу (до вологості 75%), потім йде випаровування вологи з матеріалу (до вологості 14%) і потім матеріал починає прогріватись, що не ефективно і вказує на економічність завершення процесу сушіння на вологості 14% в точці A.

Для ступеневого конвективного режиму 80/60 °C (крива 2) – на початку процесу відбувається активне прогрівання матеріалу (до вологості 82%), потім йде випаровування вологи з матеріалу (до вологості 18%), перший етап сушіння завершується при температурі теплоносія 80 °C, далі знижується температура нагрівання матеріалу до точки B. Після точки B, знову відбувається прогрівання матеріалу і процес із ефективного переходить в неефективний. При цьому режимі ефективно сушіння яблучних пластинок (наближене до нуля) можна проводити до вологості 8,8%.

Для ступеневого комбінованого інфрачервоно-конвективного режиму сушіння (крива 3) – на початку процесу відбувається активне прогрівання матеріалу (до вологості 77%), потім йде випаровування вологи з матеріалу (до вологості 23%), далі закінчується перший етап сушіння при режимі ІЧ (100 Вт) +60 °C, різко знижується температура і критерій Ребіндера до точки C. Це пов'язано з відключення ІЧ-

випромінювання. Потім починається знову прогрівання матеріалу при температурі теплоносія 60 °С. Економічно доцільно проводити сушіння до точки А, як і в режимі 60 °С, до кінцевої вологості 14%.

5. Дослідження якісних характеристик яблучних слайсів

Властивість до набухання – один із критеріїв якості сушеної продукції.

Перед розрахунком відновлюваності визначали коефіцієнт набухання (K_n), який показує відносне збільшення маси продукту після набухання та визначає здатність до відновлення початкових властивостей матеріалу при зневодненні. Динаміку зміни коефіцієнта набухання K_n від режиму сушіння представлено на рис. 10.

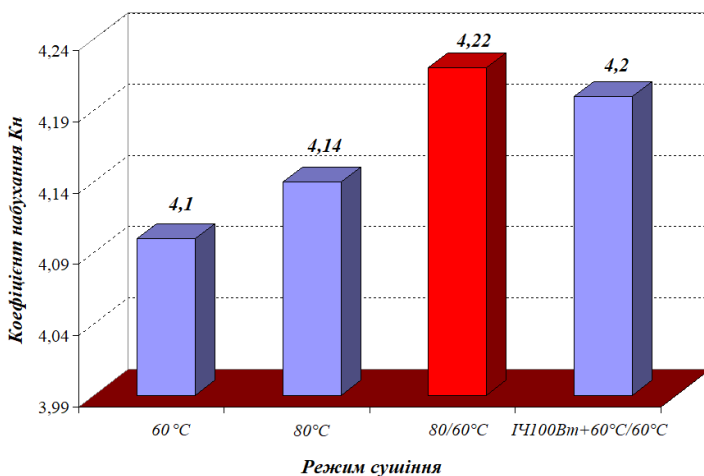


Рис. 10. Динаміка зміни коефіцієнту набухання K_n висушених яблучних слайсів розмірами 5×10×65 мм за різних режимів сушіння, $V=1,5$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.

Використання ступеневих режимів збільшують коефіцієнт набухання до 4,2–4,22, тобто зберігається здатність до відновлення властивостей після сушіння.

Відповідно до ¹³ відновлюваність матеріалу є більш показовою величиною, яка безпосередньо показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближається до вихідної, яка приймається за 100%.

¹³ Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices. Journal of Chemistry. Vol. 2014. Article ID 453175. 2014. p. 1 – 8. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>.

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

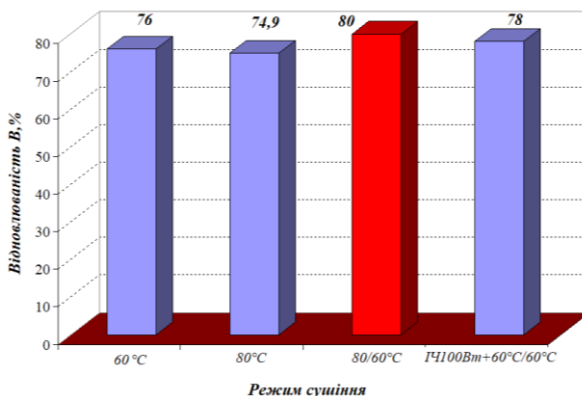


Рис. 11. Динаміка зміни відновлюваності висушених яблучних пластинок з розмірами 5×10×65 мм за різних режимів сушіння, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.

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 16}.

Органолептичні показники висушених слайсів, одержаних за режимом зневоднення 80/60 °С та комбінованим ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С, були наступними: збалансований смак, природний 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

¹⁴ 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

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>.

¹⁶ 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>

пояснюється тривалим процесом зневоднення, що призводить до реакції ферментативного потемніння зразків та руйнування біологічно-активних речовин наявних у вихідні сировині.

ВИСНОВКИ

Узагальнюючи результати досліджень, можна зробити висновок, що висока температура теплоносія забезпечує незначну тривалість процесу зневоднення, але органолептичні показники готового продукту неприйнятні.

Сушіння при низьких температурах призводить до збільшення часу зневоднення, і як наслідок, до збільшення енерговитрат та погіршення органолептичних характеристик та відновлюваності.

Під час виконання поставлених завдань було одержано наступні результати:

1. Для підвищення інтенсивності зневоднення та зниження енергетичних витрат із скорочення тривалості сушіння, процес необхідно проводити за розробленими ступеневими режимами сушіння конвективного 80/60 °С та комбінованого інфрачервоно-конвективного ІЧ (100 Вт) + 60 °С / 60 °С.

2. Інтенсивність запропонованих ступеневих режимів сушіння підтверджується скороченням тривалості процесу у 1,9 рази порівняно з стаціонарним режимом при температурі теплоносія 60 °С.

3. Проведений аналіз вказує, що зазначені ступеневі режими зневоднення забезпечують інтенсифікацію процесу сушіння за рахунок підвищення середньої інтенсивності прогрівання матеріалу та прискорення середньої інтенсивності видалення вологи без погіршення якісних характеристик кінцевого продукту.

4. На підставі досліджень кінетики вологообміну 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%.

5. Побудовано залежність числа Ребіндера від зміни вологості матеріалу за різних режимів сушіння, характер яких доводить доцільність та ефективність використання розроблених ступеневих режимів зневоднення.

6. 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.

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто інтенсифікацію процесу сушіння яблучних слайсів до низької залишкової вологості. 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.

Представлено температурні та кінетичні криві, зміну швидкості сушіння для досліджуваних режимів зневоднення. Одержано формулу для визначення загальної тривалості процесу сушіння яблучних слайсів комбінованим способом, побудовано залежність числа Ребіндера для досліджуваних режимів зневоднення.

На підставі аналізу експериментальних даних та узагальненні результатів досліджень вперше запропоновано спосіб визначення інтенсивності сушіння по середній вологовіддачі та середній температурі прогрівання матеріалу за хвилину, на першому етапі сушіння та за весь час сушіння.

Ефективність запропонованих режимів підтверджується скороченням тривалості процесу сушіння у 1,9 рази порівняно з стаціонарним режимом при температурі теплоносія 60 °С.

Отриманий сушений продукт характеризується високою відновлюваністю (78–80%) та належними органолептичними властивостями.

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. Bulgakov V., Bandura, V., Arak Margus, Olt Jüri. Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. *Agronomy Research*. 2018. 16 (2). P. 349–356. <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.054>
3. 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. 37 (2). P. 161–164. <https://doi.org/10.15835/nbha3723465>
4. Бессараб О.С., Шутюк В.В. Технологія сушіння плодів та овочів. Київ: НУХТ. 2002. 84 с.
5. Hany S. El-Mesery, Kwami Ashiagbor, Zicheng 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>.

6. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovy, I., Gavrilo, 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

7. 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. 8 (94), p. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>

8. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. – Київ: *Сік Груп Україна*, 2018. 228 с.

9. 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.

10. 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>.

11. Гусарова О.В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук: дис...канд. техн. наук.: 05.14.06. Київ: *ІТТФ НАН України*. 2020. 241 с.

12. Дабіжа Н. О. Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту: дис....канд. техн. наук.: 05.14.06. Київ: *ІТТФ НАН України*. 2013. 208 с.

13. 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.

14. 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>.

15. 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>

Information about the authors:

Paziuk Vadym Mykhailovych,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Leader Researcher at the Department of Mass Transfer
in Heat Technologies,
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy
of Sciences of Ukraine
2-a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine

Husarova Olena Vitaliivna,

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37, Beresteiskyi ave, Kyiv, 03056, Ukraine;
Senior Research Fellow at the Department of Mass Transfer
in Heat Technologies
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy
of Sciences of Ukraine
2-a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine