

УДК 664.8.047

СТАТИКА, КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ БАНАНІВ ДО НИЗЬКОЇ ЗАЛИШКОВОЇ ВОЛОГОСТІ

Снєжкін Ю.Ф.¹, академік НАН України, Дабіжа Н.О.², канд. техн. наук.,
Гусарова О.В.³, канд. техн. наук, Малащук Н.С.⁴, PhD

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 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 Капніст, 2а, м. Київ, 03057
email: dabizha.nataliia@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6124-1981>

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

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

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057
email: malashchuk_n@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8648-1006>

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.1>

У статті досліджено процес сушіння бананів до низької залишкової вологості 6...7 % за різних режимів зневоднення та форми матеріалу. Рекомендовано, з метою прискорення процесу, вибирати недозрілі банани зі ступенями зрілості 2 та 3. Досліджено гігротермічний рівноважний стан (статика) та кінетика сушіння банану. Одержана залежність для визначення загальної тривалості процесу сушіння. Визначені залежності критерію оптимізації процесу сушіння та густини теплового потоку від вологовмісту банана. За даними щодо питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг води запропонований ступеневий режим сушіння банану за температур 100/60 °C, як найбільш енергоефективний.

The article investigates the process of drying bananas to a low residual moisture content of 6...7% under different dehydration modes and material forms. To speed up the drying process, it is recommended to select unripe bananas with ripeness levels 2 and 3. The hygrothermal equilibrium condition (statics) and kinetics of banana drying were studied. The obtained dependence for determining the total duration of the drying process. The dependencies of the drying process optimization criterion and heat flux density on banana moisture content have been determined. Based on data on the specific heat consumption for evaporating 1 kg of water, a two-stage banana drying mode at temperatures of 100/60 °C was proposed as the most energy-efficient.

Бібл. 21, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: банан, сорбційні властивості, конвективне сушіння, ступеневі режими зневоднення, критерій оптимізації, питомі витрати тепла, енергоефективність.

d – вологовміст сушильного агента, г/кг с.п.;

$N_{\max}$ – максимальна швидкість сушіння, с⁻¹;

m – маса, кг;

p – парціальний тиск, мм рт. ст.;

q – питомі витрати теплоти, кДж/кг;

$q(\tau)$ – густина теплового потоку, кВт/м²;

Rb – критерій оптимізації процесу сушіння;

t – температура, °C;

u – вологовміст сировини, кг/кг с.м.;

v – швидкість руху сушильного агента, м/с;

W – відносна вологість сировини, %;

χ_i – відносні коефіцієнти сушіння;

τ – час, с.

Вступ

Банан є одним з найбільш розповсюджених та улюблених фруктів мільйонів споживачів по всьому світі. Це найважливіша сільськогосподарських культура після рису та пшениці [1, 2].

Банани становлять приблизно 15% від загального світового виробництва свіжих фруктів. Але, за оцінками [1], п'ята частина бананів щорічно відбраковується че-

рез неналежний зовнішній вигляд, через що вони не підлягають продажу. Все це призводить до втрати врожаю та збитків. Збитки та відходи виникають на всіх етапах виробництва, починаючи від збору врожаю і до отримання продукту споживачем.

Тому актуальним є пошук способів збереження та перероблення надлишкової сировини на продукти харчування з підвищеним терміном зберігання.

З бананів виготовляють пюре, макарони, енергетичні батончики, сухофрукти, чіпси, пластівці, борошно та порошки використовуючи при цьому різні методи перероблення [1-4].

Сушіння є методом консервування та продовження терміну зберігання продуктів шляхом зниження активності води. Сушіння запобігає розвитку мікроорганізмів, дозволяє дешевше транспортування та пакування, економить місце при зберіганні тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Характеристика бананів, як об'єкту сушіння

М'якоть є їстівною частиною харчових бананів. У стиглих бананах м'якоть становить 68...70% маси плоду, решта припадає на шкірку. М'якоть стиглих бананів залежно від ботанічного сорту має біле або світло-жовте забарвлення, ніжну консистенцію, прекрасний аромат і приємний солодкий смак. Високі смакові якості бананів, а також їх харчова цінність обумовлюються хімічним складом плодів.

Найважливішою складовою частиною бананів є цукри, вміст яких коливається від 16 до 20%. З цукрів у бананах переважають сахароза і фруктоза. Крім цукрів, у м'якоті стиглих бананів містяться в невеликій кількості крохмаль, органічні кислоти, пектинові, дубильні, мінеральні та ароматичні речовини, вітаміни і ферменти. Вміст вітаміну С в стиглих бананах становить в середньому 8...12 мг% [2, 5]. Вони багаті на калій та кальцій і мають низький вміст натрію, містять значну кількість антиоксидантних речовин (фенольні сполуки, вітамін А, вітаміни групи В та аскорбінова кислота) [2].

Аромат стиглих бананів залежить від наявності в м'якоті складних, мало вивчених ефірів.

У незрілих плодів шкірка має зелене забарвлення, майже не відділяється від м'якоті. М'якоть незрілих

плодів не має характерного, властивого зрілим плодам аромату та має присмак свіжих огірків або гарбуза. Консистенція м'якоті тверда, смак терпкий. Тверда консистенція м'якоті незрілих бананів обумовлена присутністю нерозчинного протопектину, а терпкий смак – великою кількістю дубильних речовин. При згинанні незрілі банани ламаються, а не гнуться.

Високих споживчих та смакових якостей м'якоть бананів набуває тільки при нормальному дозріванні плодів в штучних умовах. Необхідність зняття плодів в незрілому вигляді пояснюється тим, що банани, які дозріли на рослині, не набувають належного смаку і аромату, втрачають поживні властивості, шкірка їх розтріскується, в результаті чого м'якоть легко пошкоджується хворобами і шкідниками.

Велике значення при дозріванні бананів мають процеси перетворення крохмалю в цукор. У результаті цих процесів поступово змінюються консистенція та смак м'якоті плодів.

Під час дозрівання бананів у шкірці та м'якоті плодів під впливом ферментів відбуваються складні перетворення речовин: нерозчинний протопектин переходить у водорозчинний пектин, а крохмаль – у цукор, змінюється колір шкірки та м'якоті, утворюються ароматичні речовини, відбувається низка інших складних змін хімічного складу плодів [1, 3-7].

Загалом існує 7 ступенів стиглості бананів. За даними Джерел [1, 7], незрілі плоди бананів за зовнішнім виглядом, консистенцією м'якоті і хімічним складом, особливо за вмістом цукру і крохмалю, різко відрізняються від зрілих, таблиця 1.

У зелених плодах з вуглеводів переважає крохмаль, вміст якого коливається в залежності від сорту і району зростання в межах 18...20%; цукру в зелених плодах міститься незначна кількість.

Табл. 1. Зміни вмісту вологи та хімічного складу бананів залежно від ступеня зрілості [1]

Table 1. Changes in moisture content and chemical composition of bananas depending on the degree of ripeness

Стадія стиглості	Волога (%)	Загальні цукри (г/100 г)	Крохмаль (г/100 г)	Лимонна к-та (г/100 г)	Яблучна к-та (г/100 г)	Зола (г/100 г)	Калій (мг/100 г)	Магній (мг/100 г)
1	76.1	1.26	2.80	2.34	2.24	4.20	421.81	36.26
2	76.7	2.69	1.50	2.27	2.17	4.08	501.88	40.32
3	77.3	4.01	1.64	2.19	2.10	4.07	528.36	40.90
4	78.3	3.99	1.59	2.24	2.14	3.83	565.15	48.78
5	79.3	5.17	1.76	2.01	1.92	3.40	583.74	57.66
6	82.6	5.37	1.66	1.65	1.58	3.31	630.04	58.75
7	86.2	12.28	0.91	1.48	1.41	3.17	708.81	59.45

У міру дозрівання співвідношення крохмалю і цукру різко змінюється. Як видно з таблиці 1, кількість крохмалю скорочується у 3 рази, а цукру збільшується в 10 разів. Кількість золи зменшується, а вміст калію та магнію значно зростає, що покращує поживну цінність. Відносно висока кислотність у стадіях 1 – 3 надає легку кислинку м'якоті, може гальмувати ферментацію, зберігати колір та покращувати смак. На стадіях 5 – 7 кислотність зменшується, що може погіршити зберігання.

Відомо також, що вміст вітаміну С в процесі дозрівання плодів змінюється незначно.

Аналіз сучасних методів сушіння

Існує велика кількість публікацій присвячених процесу сушіння бананів. Переважна більшість досліджень спрямовані на покращення процесу шляхом зменшення енерговитрат, підвищення ефективності сушіння, мінімізації небажаного впливу на органолептичні та харчові властивості, а також отримання високоякісної продукції з мінімальними капіталовкладеннями.

Для сушіння фруктів, зокрема і бананів використовуються традиційні методи зневоднення: сонячне, конвективне, кондуктивне, мікрохвильове, вакуумне, ультразвукове, розпилювальне, осмотичне, псевдозрідження та сублімаційне [2, 4, 7-13].

Такі методи зневоднення мають свої переваги та недоліки. До основних переваг відносять простоту, дешевизну та надійність, до недоліків – значні енерговитрати, тривалість процесу та погіршення якості готового продукту.

Останнім часом увага науковців спрямована на дослідженні методів сушіння фруктів, в т. ч. бананів, з комбінованим енергопідведенням. Відомі дослідження ІЧ-випромінювання та конвективного, вакуум-мікрохвильового, ІЧ та вакуумного, сублімаційно-конвективного, конвективно-конденсаційного сушіння тощо [2, 7, 8, 10, 12-15]. Такі методи забезпечують якість харчових продуктів та є більш ефективними порівняно з традиційними. Комбінування методів сушіння дозволяє поєднати сильні сторони різних способів і сприяє підвищенню енергоефективності процесу та якості продуктів.

Інноваційні технології сушіння урізноманітнюють якісні показники продуктів (надаючи їм певний вигляд, структуру чи характеристики), мінімізують втрати продуктів харчування та забезпечують кращий економічний ефект для виробників.

Узагальнення науково-технічних даних показує, що підвищення температури сушильного агента пришвидшує зневоднення, однак занадто високі темпе-

ратури викликають потемніння, втрату аромату та поживних речовин, особливо у термочутливих плодах. У випадку бананів, висока температура активує ферменти та карамелізацію цукрів, що призводить до потемніння та зниження товарної якості продукту. Помірні температури (60 °C) забезпечують збереження якості, але процес триває занадто довго [2, 7, 15]. Попередня обробка може давати як позитивний так і негативний ефект, тому потрібні додаткові дослідження впливу різних видів обробки на процес сушіння та органолептичні характеристики продукту [16].

З огляду на вищенаведене, можна зробити висновок, що банани – складний об'єкт для сушіння.

Високий вміст вологи (76...86%), значні зміни у хімічному складі під час дозрівання приводять до того, що текстура бананів суттєво змінюється: м'якість стає м'якшою, що ускладнює нарізання і сушіння рівними скибками. Такі фізико-хімічні особливості потребують ретельного вибору ступеня зрілості для отримання якісного сушеного продукту. Тип методу сушіння та попередня обробка також впливають на фізико-хімічні та харчові властивості бананових продуктів [2, 4, 7, 15, 16].

Мета досліджень

Метою роботи є дослідження статистики та кінетики конвективного сушіння м'якоті бананів до низької залишкової вологості, визначення енергетичних характеристик процесу та розроблення енергоефективного режиму зневоднення.

Матеріали і методи досліджень

Нами було встановлено, що значний вплив на процес сушіння справляє ступінь зрілості бананів і вміст в них цукрів. При збільшенні вмісту цукру тривалість процесу сушіння збільшується в 3 рази [18, 19].

З метою прискорення процесу необхідно вибирати недозрілі банани зі ступенями зрілості 2 та 3. Банани мають нижчу вологість та помірну кислотність, що прискорює зневоднення та зменшує енергетичні витрати на процес. У таких бананів тверда м'якість, їх легко нарізати. Високий вміст крохмалю та низький вміст цукру забезпечать хрустку структуру, зменшення потемніння та липкості. Помірна кислотність сприятиме кращому збереженню смаку та кольору.

Банани ступенем 5 – 7 не рекомендовані для сушіння на чіпси і краще підходять для інших видів переробки, наприклад, на пюре [1, 6, 7].

Для проведення досліджень в місцевій торгівельній мережі були придбані банани зі ступенем зрілості 2...3 і початковою відносною вологістю 75...80%. Очищені

від шкірки банани нарізали кубиками $5 \times 5 \times 5$ мм і пелюстками завтовшки $5 \dots 6$ мм та довжиною $65 \dots 75$ мм. Кубики бананів сушили насипним шаром $60 \times 60 \times 10$ мм, пелюстки – в одиничному шарі. Процес проводили до досягнення матеріалом низької вологості $6 \dots 7\%$.

Вміст води в матеріалі визначали за ДСТУ 7804:2015 шляхом сушіння зразків в бюксах до постійної маси в сушильній шафі з температурою $100 \dots 105$ °С фіксуючи масу бюкси з навішенням до висушування m_1 , масу бюкси з навішенням після висушування m_2 , масу пустої бюкси m_0 .

При вирішенні задач, що пов'язані зі змінюванням кількості води в матеріалі в процесі його сушіння, в розрахунках швидкості сушіння, критерію оптимізації та густини теплових потоків використовували вологовміст u – відношення маси води m_w до маси сухого матеріалу $m_{с.м.}$, кг/кг с.м.:

$$u = \frac{m_w}{m_{с.м.}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \quad (1)$$

При вирішенні задач, що пов'язані з порівнянням зразків з однаковою масою, при розрахунках маси сухого матеріалу використовували відносну вологість W – відношення маси води m_w до маси вологого матеріалу m , %:

$$W = \frac{m_w}{m} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \quad (2)$$

Статика процесу сушіння вивчає взаємодію вологого матеріалу з повітрям незалежно від часу, в результаті якої він наближається до гігротермічного рівноважного стану. Дослідження гігротермічного рівноважного стану банану проводилися з застосуванням тензометричного (статичного) методу Ван Бамелена [20]. Згідно методу зразки висушеного матеріалу в бюксах витримують в ексікаторах над водними розчинами сірчаної кислоти. При певній температурі та концентрації сірчаної кислоти в ексікаторі встановлюється парціальний тиск пари p , що відповідає цій концентрації та відносному тиску p/p_s . Відносна вологість повітря визначається як $\phi = p/p_s \cdot 100\%$. Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0.001 г до моменту досягнення ними постійної маси, що свідчить про настання стану рівноваги при даній температурі й відносній вологості повітря. Рівноважний вологовміст матеріалу u_p визначається як відношення маси води в матеріалі в рівноважному стані до маси сухого матеріалу.

Кінетика процесу сушіння вивчає змінювання середнього (інтегрального) вологовмісту і середньооб'ємної

температури матеріалу в часі. Дослідження кінетики процесу зневоднення бананів з метою вивчення основних закономірностей тепломасопереносу проводили на експериментальному сушильному стенді.

Експериментальний стенд складається із системи ізованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції сушильного агента, сушильних камер, системи контролю і підтримання температури сушильного агента, автоматичного збору і обробки інформації про перебіг процесу зневоднення матеріалу [12].

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 [12].

Дослідження проводилися при швидкості сушильного агента 1.0 м/с, його вологовмісті 11 г/кг сухого повітря та при температурах $100, 80, 60, 100/60$ °С.

За експериментальними даними будували криві кінетики сушіння $u = f(\tau)$, криві швидкості сушіння $du/d\tau = f(u)$, що отримані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння, а також температурні криві нагрівання матеріалу $t = f(\tau)$.

На основі експериментальних даних визначають тривалість процесу сушіння бананів за узагальненою кривою сушіння як функцією вологовмісту матеріалу від узагальненого часу $N\tau$ за формулою (3):

$$\tau_3 = \frac{1}{N_{\max}} \left(\frac{1}{\chi_2} \lg \frac{u_{\text{п}}}{u_{\text{кр}1}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{u_{\text{кр}1}}{u_{\text{кр}2}} + \frac{1}{\chi_4} \lg \frac{u_{\text{кр}2}}{u_{\text{к}}} \right) \quad (3)$$

У формулі (3) величини критичних вологовмістів $u_{\text{кр}}$ і відносних коефіцієнтів χ знаходять із узагальненої кривої кінетики сушіння, що побудована в напівлогарифмічній системі координат [20].

Енергоефективність процесу сушіння характеризується такими основними показниками:

- енергетичною (тепловою) ефективністю η , яка визначається як співвідношення корисної теплоти, що необхідна на випаровування води, до загальної теплоти, що використовується на випаровування води та нагрівання вологого матеріалу;
- питомими витратами теплоти на випаровування 1 кг води q , кДж/кг.

Розрахунок енергетичних характеристик процесу – критерію оптимізації процесу сушіння та теплових

потоків на поверхні матеріалу – здійснювали за методикою, викладеною в [20].

За даними з кінетики вологообміну можливо встановити кінетику теплообміну під час сушіння банану. Зв'язок між теплообміном і вологообміном встановлюється за основним рівнянням кінетики процесу сушіння (4):

$$q^*(\tau) = \frac{q(\tau)}{q_N} = \left(\frac{du}{d\tau}\right)^* (1 + Rb), \quad (4)$$

де $q^*(\tau)$ – відносна густина теплового потоку; $q(\tau)$ – потік тепла в періоді падаючої швидкості сушіння, кВт/м²; q_N – потік тепла за постійної (максимальної) швидкості сушіння, кВт/м²; $\left(\frac{du}{d\tau}\right)^* = \frac{1}{N} \left(\frac{du}{d\tau}\right)$ – відносна швидкість сушіння; $N = \left(\frac{du}{d\tau}\right)_N$ – нормувальний коефіцієнт, який визначається за постійної (максимальної) швидкості сушіння; Rb – критерій оптимізації, який характеризує співвідношення кількості теплоти, яка витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, яка витрачена на випаровування з нього води, за нескінченно малий проміжок часу.

Число Rb розраховується за формулою (5):

$$Rb = \frac{c}{r} \left(\frac{dt}{du}\right), \quad (5)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг · К); r – питома теплота випаровування води, кДж/кг.

Змінювання густини теплового потоку $q_n(\tau)$ на поверхні матеріалу впродовж процесу сушіння, визначається за залежністю (6), кВт/м²:

$$q_n(\tau) = q^*(\tau) \cdot q_N \quad (6)$$

Густина теплового потоку в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, визначається за (7):

$$q_N = r_N \frac{m_{a.c.}}{S} \left(\frac{du}{d\tau}\right)_N, \quad (7)$$

де $m_{a.c.}$ – маса абсолютно сухого матеріалу, кг; S – площа поверхні вологого матеріалу, м².

Результати та їх обговорення

Дослідження сорбційних властивостей бананів

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма сорбції пари води паренхімними тканинами банана за температури середовища 20 °С в діапазоні відносних тисків p/p_s від 0.4 до 0.9 (рис. 1). Як видно з ізотерми сорбції, рівноважний вологовміст банана при $p/p_s = 0.45$ стано-

вить 0.07 кг/кг с.м. (6.5% відн), тому при виробництві продуктів з бананів із низькою вологістю, висушений матеріал необхідно упаковувати в герметичну тару для збереження заданих властивостей. При одержанні продуктів з бананів із проміжною вологістю для запобігання розвитку мікроорганізмів вологовміст банану не повинен перевищувати 0.20 кг/кг с.м. (16.7% відн.).

Для визначення оптимальних режимів сушіння необхідно знати параметри гігротермічного рівноважного стану матеріалу з повітрям за різних температур. Використовуючи метод характеристичних кривих, що заснований на потенційній теорії сорбції, за одержаною при $t = 20$ °С ізотермою сорбції визначили максимальний гігроскопічний вологовміст паренхімних тканин банана $u_{os} = 1.109$ кг/кг с.м. та розрахували значення рівноважних вологовмістів в діапазоні температур від 50 до 80 °С.

Слід зазначити, що ізотерми сорбції відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної води). У цій області парціальний тиск пари води над поверхнею матеріалу p_m відрізняється від тиску насичення та залежить від вологовмісту і температури матеріалу (рис. 2): в міру зменшення вологовмісту і при зниженні температури p_m зменшується, й при наближенні вологовмісту до 0.07 кг/кг с. м. таке зменшення стає суттєвим. При цьому відбувається зменшення рушійної сили масообміну Δp , яка визначається різницею між парціальним тиском пари води на поверхні матеріалу p_m і тиском пари води в парогазовому потоку p_c .

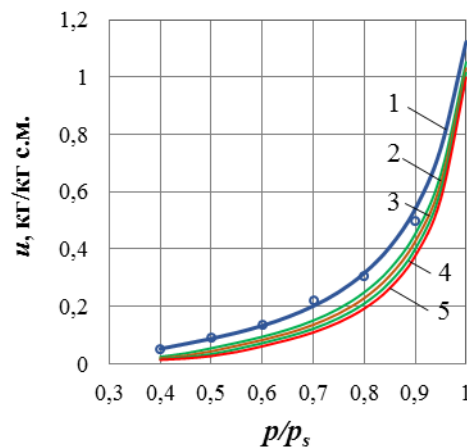


Рис. 1. Ізотерма адсорбції пари води паренхімними тканинами банана: 1 – $t = 20$ °С;

2 – $t = 50$ °С; 3 – $t = 60$ °С; 4 – $t = 70$ °С; 5 – $t = 80$ °С

Fig. 1. Isotherm of water vapour adsorption by banana parenchyma tissues: 1 – $t = 20$ °С;

2 – $t = 50$ °С; 3 – $t = 60$ °С; 4 – $t = 70$ °С; 5 – $t = 80$ °С

Таки чином, здійснення процесу конвективного сушіння банана на етапі досушування при низькій температурі до низького залишкового вологовмісту 6...7% в кліматичних умовах тропіків має певні

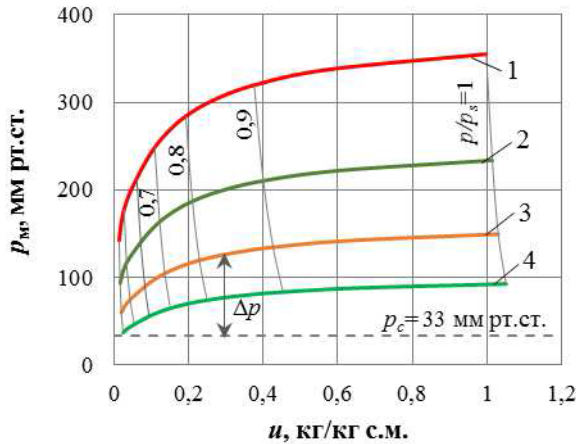


Рис. 2. Залежність парціального тиску пари води на поверхні банана від вологовмісту і температури:

1 – $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2. Dependence of the partial pressure of water vapour on the banana surface on moisture content and temperature: 1 – $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

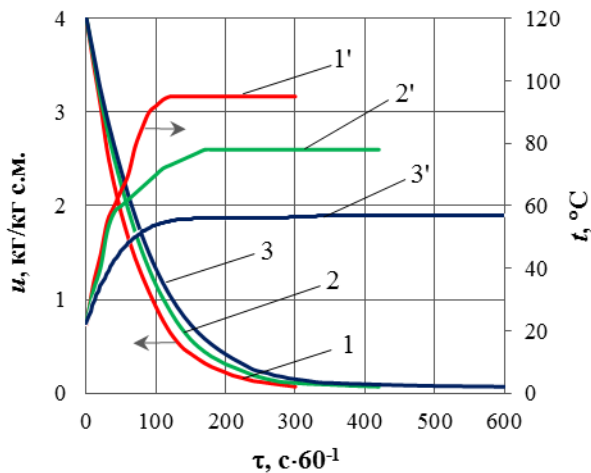


Рис. 3. Вплив температури сушильного агента на кінетику сушіння кубиків банану та змінювання температури на поверхні матеріалу:

1 – $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Effect of drying agent temperature on the drying kinetics of banana cubes and temperature changes on the surface of the material:

1 – $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

труднощі, пов'язані з високим вологовмістом сушильного агента, який може змінюватися в межах від 25 до 32 г/кг с.п., парціальний тиск водяної пари відповідно буде змінюватися від 28 до 33 мм рт. ст. Суттєве зменшення масообмінного напору Δp між матеріалом і сушильним агентом в даному випадку призведе до зниження швидкості зневоднення, що значно подовжить тривалість процесу і збільшить енерговитрати.

Дослідження кінетики сушіння бананів

Вплив температури сушильного агента на процес сушіння кубиків бананів у вигляді кривих сушіння та змінювання температури на поверхні матеріалу представлено на рисунку 3. З підвищенням температури сушильного агента з 60 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ тривалість процесу скорочується в два рази.

При підвищенні температури сушильного агента до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ вже через 40...50 хв спостерігалось перевищення температури поверхневого шару бананів понад $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. У цей момент спостерігалось потемніння поверхні бананів, а до кінця процесу сушіння банани ставали темнокоричневими.

При м'яких режимах сушіння (80 і $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) температура поверхні бананів не перевищувала 75 та $58\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно. До кінця сушіння шар бананів злегка потемнів, але зберігся приємний аромат і смак, що властиві вихідному банану. За температури сушильного агента $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ потемніння поверхні бананів пояснюється тривалістю процесу, ферментативною активністю та карамелізацією цукрів.

На рисунку 4 наведені криві швидкості сушіння кубиків бананів за різних температур сушильного агента.

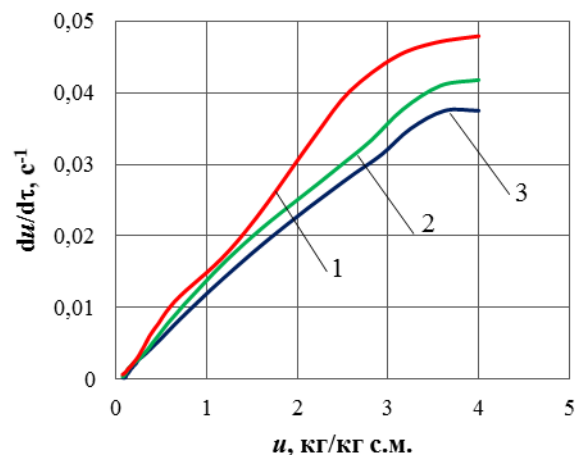


Рис. 4. Криві швидкості сушіння кубиків банану:

1 – $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Drying rate curves for banana cubes:

1 – $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналізуючи криві швидкості сушіння, можна зробити висновок, що характер процесу сушіння бананів залежить від температури сушильного агента. При м'яких режимах (60 °С) спостерігається перший період сушіння. Якщо температура повітря підтримується на рівні 80...100 °С, то сушіння протікає в другому періоді, та відразу ж після прогрівання матеріалу спостерігається плавне зниження швидкості сушіння бананів.

Результати сушіння бананів нарізаних кубиками і пелюстками при ступеневому режимі 100/60 °С зображено на рисунку 5.

Як видно з температурних кривих (рис. 3), в початковий період сушіння банану висока температура сушильного агента не є критичною, оскільки температура на його поверхні не перевищує гранично допустимої. Виходячи з цього перехід з температури 100 °С на 60 °С відбувався через 40 хвилин від початку процесу при досягненні поверхнею матеріалу 65 °С.

У результаті при ступеневому режимі 100/60 °С температура матеріалу не перевищувала 60 °С, тому поверхня зразків залишалася світлою. При цьому, не спостерігалось обуглювання торців матеріалу. Тривалість сушіння за ступеневим режимом скоротилася в 1,4 рази в порівнянні з процесом за температури 60 °С.

Визначення тривалості сушіння

На рисунку 6 представлена узагальнена крива сушіння кубиків банану в шарі 60×60×10 мм.

За узагальненою кривою сушіння в напівлогарифмічних координатах визначені відносні коефіцієнти сушіння χ_1 і χ_2 :

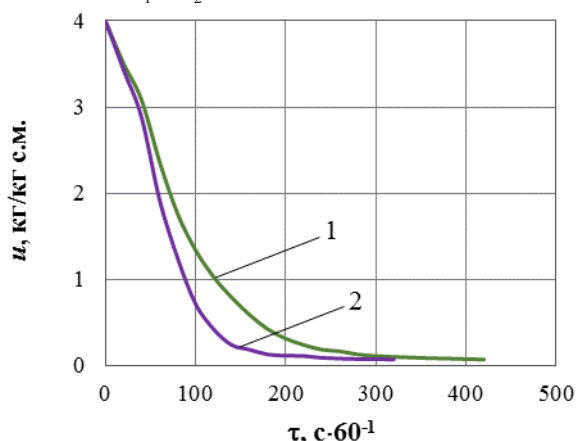


Рис. 5. Вплив форми матеріалу на кінетику сушіння банану при ступеневому режимі 100/60 °С:

1 – кубики, 2 – пелюстки

Fig. 5. Effect of material shape on the kinetics of banana drying in a step mode at 100/60 °С:

1 – cubes, 2 – petals

$$\chi_1 = 0.0012, \chi_2 = 0.00021.$$

Розв'язуючи рівняння (3), отримуємо розрахункову формулу для визначення тривалості процесу сушіння банана:

$$\tau = \frac{22.5}{N_{\max}} \quad (8)$$

Підставляючи в рівняння (8) значення максимальної швидкості сушіння $N_{\max}$, можна заздалегідь оцінити тривалість процесу сушіння бананів при різних режимах зневоднення.

Дослідження тепломасообміну в процесі сушіння бананів

За даними щодо кінетики зневоднення (рис. 3) за формулою (5) було вираховано змінювання критерію оптимізації Rb в процесі сушіння банану для різних температурних режимів (рис. 7).

Питому теплоємність банану при цьому розраховували за формулою (9) [21], кДж/кг·К:

$$c_p = 1.34 + 0.0262W \quad (9)$$

Оскільки нагрівання матеріалу за своєю сутністю є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини Rb до мінімально можливого значення. Як видно з рис. 7, на початку процесу сушіння Rb має досить великі значення, що пов'язано з прогріванням матеріалу. У процесі сушіння Rb зменшується майже до нуля – теплота витрачається переважно на випаровування вологи з матеріалу, а не на його нагрівання. При досягненні матеріалом вологовмісту

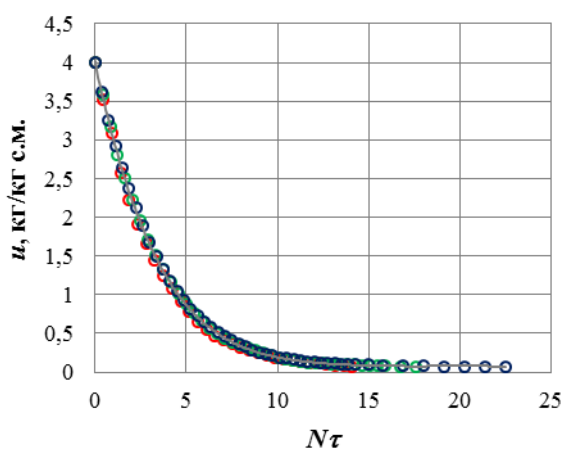


Рис. 6. Узагальнена крива кінетики сушіння кубиків банану в шарі

Fig. 6. Generalized curve of the drying kinetics of banana cubes in a layer

1.0 кг/кг с.м. R_b різко зростає, відбувається нагрівання матеріалу, що при температурах сушіння вищих за 60° призводить до погіршення органолептичних показників висушеного банану. З цього моменту доцільно знижува-

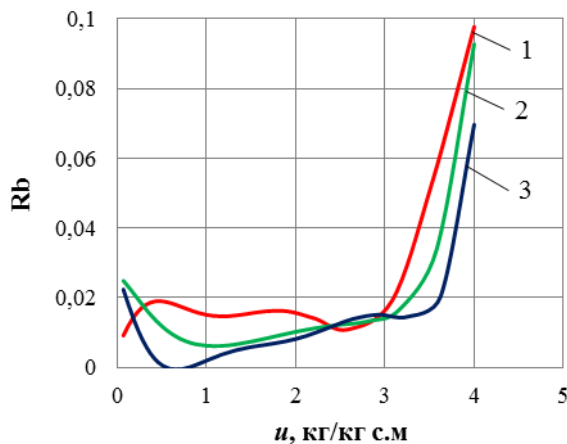


Рис. 7. Залежність критерію оптимізації R_b від вологовмісту банана в процесі сушіння за різних температур сушильного агента:

1 – $t = 100^\circ\text{C}$; 2 – $t = 80^\circ\text{C}$; 3 – $t = 60^\circ\text{C}$

Fig. 7. Dependence of the optimization criterion R_b on the moisture content of the banana during the drying process at different temperatures of the drying agent:

1 – $t = 100^\circ\text{C}$; 2 – $t = 80^\circ\text{C}$; 3 – $t = 60^\circ\text{C}$

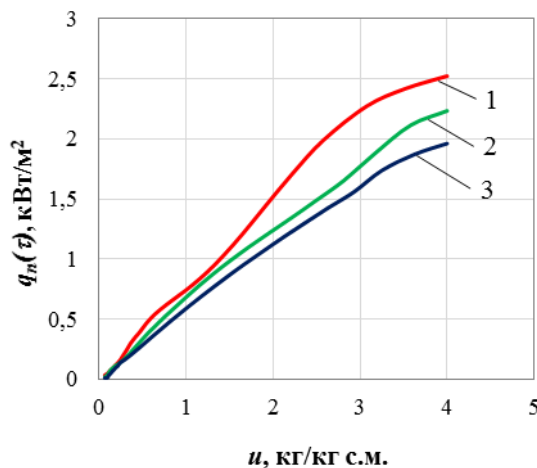


Рис. 8. Густина теплового потоку в залежності від вологовмісту банана в процесі сушіння за різних температур сушильного агента:

1 – $t = 100^\circ\text{C}$; 2 – $t = 80^\circ\text{C}$; 3 – $t = 60^\circ\text{C}$

Fig. 8. Heat flux density depending on the moisture content of the banana during drying at different temperatures of the drying agent:

1 – $t = 100^\circ\text{C}$; 2 – $t = 80^\circ\text{C}$; 3 – $t = 60^\circ\text{C}$

ти температуру сушильного агента не лише для більш раціонального використання енергії, але й для позитивного впливу на якість готового продукту.

За одержаними даними щодо змінювання критерію оптимізації в процесі сушіння банану за формулою (6) розраховане змінювання густини теплового потоку за різних температур сушильного агента в залежності від вологовмісту (рис. 8). Як видно з графіків, зі зниженням вологовмісту банану теплові потоки на поверхні зменшуються, тобто на нагрівання вологого матеріалу та випаровування води потрібно менше теплоти. Це значить, що необхідно зменшити підведення енергії до сушильної камери задля більш раціонального її використання.

За даними з кінетики теплообміну (рис. 8) визначені питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води під час сушіння кубиків банана в шарі за різних температур (рис. 9).

Як видно з рисунку 9, для здійснення ступеневого режиму за температур $100/60^\circ\text{C}$ необхідні найменші витрати теплоти. Енергетична (теплова) ефективність власне процесу сушіння для всіх режимів є високою $\eta = 0.92 \dots 0.96$. Тобто, більша кількість теплоти використовується на випаровування ніж на нагрівання, що очевидно з графіків залежності критерію оптимізації від вологовмісту (рис. 7). Низька енергетична ефективність конвективних сушарок обумовлена великими нераціональними втратами теплоти з повітрям, що йде, через стінки сушарки, а також на нагрівання конструкцій.

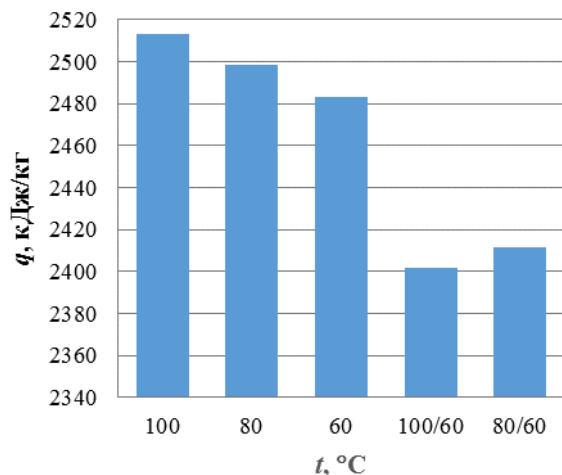


Рис. 9. Питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води за різних режимів сушіння кубиків банана в шарі

Fig. 9. Specific heat consumption for evaporation of 1 kg of water under different drying modes of banana cubes in a layer

Проведені комплексні дослідження дозволяють розробити енергоефективну технологію сушіння бананів до низької залишкової вологості для одержання чіпсів високої якості, особливістю якої є проведення процесу зневоднення за ступеневим режимом за температур сушильного агента 100/60 °С. Використання високої температури на першій стадії позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість.

Обмеження використання підвищеної температури сушильного агента обумовлене гранично допустимою температурою нагріву матеріалу, яка під час сушіння банану в шарі за безперервного нагрівання не повинна перевищувати 60 °С. Тому після досягнення матеріалом температури 50 °С (температура на поверхні наближується до 60 °С) необхідно знижувати температуру зневоднювання. Проте під час низькотемпературного сушіння до залишкового вологовмісту 0.06 кг/кг с.п. виявляється значний вплив вологовмісту сушильного агента на інтенсивність процесу. Як видно з рис. 2, у міру зменшення вологовмісту на поверхні матеріалу зменшується рушійна сила масообміну $\Delta p = p_m - p_c$. Тому під час досушування за температури 60 °С необхідно враховувати цей фактор.

Використання сушених бананів

Натуральні чіпси, кубики, слайси, порошки з бананів можуть використовуватися у громадському харчуванні, в кондитерських, молочних і хлібобулочних виробках, де останнім часом спостерігається тенденція до використання натуральних смакових і ароматичних речовин та стабілізуючих систем.

Бананові чіпси (або слайси) – це натуральний продукт із тривалим терміном зберігання, що набуває популярності як функціональний харчовий інгредієнт. Їх використовують як самостійний перекус, десерт або компонент для сніданкових сумішей, випічки та кондитерських виробів. Завдяки зручному формату та збереженню природного смаку, такі чіпси є здоровою альтернативою смаженим закускам.

Як показує практика, порошки вдало поєднуються з іншими харчовими інгредієнтами, надають виробам певний колір, аромат, смак, підвищують їх поживну цінність, збагачують вітамінами, вуглеводами, органічними кислотами, мікроелементами, харчовими волокнами, біологічно активними речовинами. Використання натуральних порошоків з бананів дозволяє зменшити додавання цукру в продукти, частково замінити в цих продуктах кислоти. Наявність пектину і клітковини, що мають значну гідрофільність та здатність до набухання й структуроутворення, дозволяє використовувати бананові порошки як стабілізатори.

Залежно від виду продукту та технологічних можливостей порошки вносяться в кількості від 2.0 до 30.0% як у сухому вигляді (борошняні, кондитерські виробы), так і попередньо відновлені, наприклад, в цукровому сиропі, молоці, сироватці (йогурти, сирні десерти, креми, морозиво).

Одержання та використання сушених продуктів із бананів сприяє зменшенню харчових втрат.

Висновки

За аналізом банану як об'єкту сушіння рекомендовано при виробництві чіпсів вибирати недозрілі плоди зі ступенями зрілості 2 та 3 для прискорення процесу зневоднення.

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги (стативи) за температури 20 °С в діапазоні відносних тисків p/p_s від 0.4 до 0.9 методом характеристичних кривих одержання ізотерми сорбції пари води бананом за температур від 20 до 80 °С, що дозволяє визначити рівноважний вологовміст, який досягається при заданих тепловолігісних параметрах повітря.

На підставі ізотерм сорбції для гігроскопічної області одержана залежність парціального тиску водяної пари на поверхні банану від вологовмісту і температури в діапазоні $u = 0.03...1.11$ кг/кг с.м. і $t = 50...80$ °С.

Експериментально досліджений вплив температури на кінетику процесу сушіння кубиків банану в шарі. Встановлено, що температура сушильного агента 100 °С інтенсифікує процес зневоднення банана, але органолептичні показники матеріалу незадовільні.

На підставі досліджень кінетики вологообміну сушіння кубиків банану отримано формулу для розрахунку загальної тривалості процесу.

Одержані залежності критерію оптимізації та густини теплових потоків на поверхні матеріалу від вологовмісту банану в процесі сушіння за різних температур. За аналізом одержаних залежностей обґрунтована необхідність зниження температури на завершальній стадії та доведена доцільність використання ступеневих режимів зневоднення.

За даними з кінетики теплообміну визначені питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води під час сушіння кубиків банана в шарі за різних температурних режимів. Встановлено, що найбільш енергоефективним є ступеневий режим за температур сушильного агента 100/60 °С.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yarp M. et al. The effects of banana ripeness on quality indices for puree production // *LWT - Food Science and Technology*. 2017. Vol. 80. P. 10 – 18. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.073>
2. Sidonia Martínez, Andreina Roman-Chipantiza, Asma Boubertakh, Javier Carballo. Banana Drying: A Review on Methods and Advances // *Food Reviews International*. 2023. 39 p. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2262030>
3. Зберігання та пакування плодоовочевої продукції: практичний посібник / Т. М. Приліпко, Т. В. Коваль. Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. 143 с.
4. Muhammad Siddiq. Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition. John Wiley & Sons Ltd. 2020. 284 p. <https://doi.org/10.1002/9781119528265>
5. Santhosh Kumar Kookal, Appachanda Thimmaiah. Nutritional Composition of Staple Food Bananas of Three Cultivars in India // *American Journal of Plant Sciences*. 2018. Vol. 9. No. 12. P. 2480 – 2493. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.912179>
6. Adeyemi O.S., Oladiji A.T. Compositional changes in banana (*Musa ssp.*) fruits during ripening // *African Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 8. Iss. 5. P. 858 – 859. ISSN: 16845315.
7. Mendoza Fernando, Aguilera J.M. Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas // *Journal of Food Science*. 2006. Vol. 69 (9). P. E471 – E477. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09932.x>
8. Шапар Р., Гусарова О. Аналіз інноваційних технологій для виробництва фруктових чипсів // *Теплофізика та теплоенергетика*. 2017. № 39 (3). С. 53 – 59. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.08>
9. Шморгун В., Мартюк О. Енергетична та екологічна ефективність випарування та сушіння рідких продуктів в одній випарувально-сушильній установці // *Теплофізика та теплоенергетика*. 2024. № 46 (1). С. 39 – 43. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.5>
10. Цвіркун Л. О., Омельченко О. В. та ін. Дослідження та оптимізація процесів конвективного сушіння бананів // *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2024. № 1 (48). С. 52 – 59. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2024-48-1-52-59>
11. Гузик Д. В., Череднікова О. В. та ін. Експериментальні дослідження процесів сушіння бананів // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2023. Вип. 45. С. 21 – 28.
12. Снежкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Гусарова О. В. Інтенсивні методи сушіння шматочків яблук з конвекцією та комбінованим енергопостачанням // *Теплофізика та теплоенергетика*. 2024. Том 46 (4). С. 5 – 14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>
13. Arun S. Mujumdar, Anilkumar S. Menon. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. New York: CRC Press. 2020. 30 p.
14. Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Іванов С.О., Граков О. П. Вплив комбінованого сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів на енергетичні витрати // *Теплофізика та теплоенергетика*. 2023. Том 45 (2). С. 45 – 54. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.5>
15. Fabiano A.N. Fernandes, Sueli Rodrigues, Chung Lim Law, Arun S. Mujumdar. Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review // *Food and Bioprocess Technology*. 2011. Vol. 4. P. 163 – 185. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0323-7>
16. S. Tabtiang S. Prachayawarakon, Soponronnarit S. Effects of Osmotic Treatment and Superheated Steam Puffing Temperature on Drying Characteristics and Texture Properties of Banana Slices // *Drying Technology: An International Journal*. 2021. Vol. 30 (1). P. 20 – 28. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.613554>
17. Macedo L. L., Araújo C., Souza Cruz D., Lima Pereira G., Saraiva S. Applying vacuum pulse during ethanol pretreatment to enhance the drying rate and quality of fresh and osmo-dehydrated banana slices using coconut sugar // *Food Research International*. 2025. Vol. 208. P. 116115. ISSN 0963-9969. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116115>
18. Михайлик В.А., Снежкін Ю.Ф., Корінчевська Т.В., Горніков Ю. Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність яблучного та цукрового бурякового порошоків // *Теплофізика та теплоенергетика*. 2017. Том 37 (5). С. 23 – 37. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.03>
19. Гусарова О.В., Дабіжжа Н.О., Малащук Н.С. Дмитренко Н.В. Особливості конвективного сушіння бананів // *Збірник тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»* 9 – 13 вересня 2024 р., Одеса. 2024. С. 11 – 13.
20. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ: Сік Груп Україна. 2018. 228 с.
21. Alvarado J. de D. Specific heat of dehydrated pulps of fruits // *Journal of Food Process Engineering*. 1991. № 14. P. 189 – 195. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00090.x>

STATICS, KINETICS, AND ENERGY EFFICIENCY OF THE PROCESS OF DRYING BANANAS TO LOW RESIDUAL MOISTURE CONTENT

Sniezhkin Yu.¹, Dabizha N.², Husarova O.³, Malashchuk N.⁴

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6124-1981>, email: dabizha.nataliia@gmail.com

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

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

⁴*PhD, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8648-1006>, email: malashchuk_n@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.1>

Bananas are the most important agricultural crop after rice and wheat. One-fifth of bananas are discarded annually due to their unsuitable appearance, which makes them unsuitable for sale. Finding ways to preserve and process surplus raw materials into food products with a longer shelf life is a pressing issue.

The purpose of the work is to study the statics and kinetics of convective drying of banana flesh to low residual moisture content, determine the energy characteristics of the process, and develop an energy-efficient dehydration mode.

Research methods. Bananas with ripeness levels of 2...3 and an initial relative humidity of 75...80% were selected for the study. The bananas were cut into 5×5×5 mm cubes and 5...6 mm thick and 65...75 mm long slices. The process was carried out until the material reached a low moisture content of 6...7%.

The hygrothermal equilibrium state of bananas was studied using the Van Bamel tensometric (static) method.

The study of the kinetics of bananas 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 100, 80, 60, 100/60 °C, speed 1.0 m/s, moisture content 11 g/kg dry air.

Based on experimental data, drying kinetics curves $u=f(\tau)$, drying rate curves $du/d\tau=f(u)$ obtained by numerical differentiation of drying curves, as well as material heating temperature curves $t=f(\tau)$ were constructed.

Results and conclusions. According to the results of experimental studies on hygrothermal equilibrium (statics) at a temperature of 20 °C in the range of relative pressures p/p_s from 0.4 to 0.9 using the characteristic curve method, the isotherms of water vapor sorption by bananas at temperatures from 20 to 80 °C were obtained, which allows determining the equilibrium moisture content that is achieved at given thermal and moisture parameters of the air.

Based on sorption isotherms for the hygroscopic region, the dependence of the partial pressure of water vapor on the surface of a banana on moisture content and temperature in the range $u = 0.03...1.11$ kg/kg dry weight and $t = 50...80$ °C was obtained.

The effect of temperature on the kinetics of the drying process of banana cubes in a layer was experimentally investigated. It was determined that a drying agent temperature of 100 °C intensifies the banana dehydration process, but the organoleptic indicators of the material are unsatisfactory.

Based on studies of the kinetics of moisture exchange during the drying of banana cubes, a formula for calculating the total duration of the process was obtained.

The obtained dependencies of the optimization criterion and the density of heat flows on the surface of the material on the moisture content of the banana during drying at different temperatures. Based on the analysis of the obtained dependencies, the necessity of reducing the temperature at the finishing stage is justified and the expediency of using stepwise dehydration modes is proved.

Based on heat transfer kinetics data, the specific heat consumption for evaporating 1 kg of water during the drying of banana cubes in a layer at different temperatures was determined. It was found that the most energy-efficient mode is the step mode at drying agent temperatures of 100/60 °C.

References 21, figures 9, tables 1.

Key words: banana, sorption properties, convective drying, staged dehydration modes, optimization criterion, specific heat consumption, energy efficiency.

1. *Yap M. et al.* The effects of banana ripeness on quality indices for puree production // *LWT - Food Science and Technology*. 2017. Vol. 80. P. 10 – 18. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.073>
2. *Sidonia Martínez, Andreina Roman-Chipantiza, Asma Boubertakh, Javier Carballo.* Banana Drying: A Review on Methods and Advances // *Food Reviews International*. 2023. 39 p. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2262030>
3. *Zberihannia ta pakuvannia plodoovochevoi produktsii: praktychnyi posibnyk* [Storage and packaging of fruit and vegetable products: a practical guide] / T. M. Prylipko, T. V. Koval. Kamianets-Podilskyi: Zaklad vyshchoi osvity «Podilskyi derzhavnyi universytet», 2025. 143 p. (in Ukr).
4. *Muhammad Siddiq.* Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition. John Wiley & Sons Ltd. 2020. 284 p. <https://doi.org/10.1002/9781119528265>
5. *Santhosh Kumar Kookal, Appachanda Thimmaiah.* Nutritional Composition of Staple Food Bananas of Three Cultivars in India // *American Journal of Plant Sciences*. 2018. Vol. 9. No. 12. P. 2480 – 2493. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.912179>
6. *Adeyemi O.S., Oladiji A.T.* Compositional changes in banana (*Musa ssp.*) fruits during ripening // *African Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 8. Iss. 5. P. 858 – 859. ISSN: 16845315.
7. *Mendoza Fernando, Aguilera J.M.* Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas // *Journal of Food Science*. 2006. Vol. 69 (9). P. E471 – E477. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09932.x>
8. *Shapar R., Husarova O.* Analiz innovatsiinykh tekhnolohii dlia vyrobnytstva fruktovykh chypsiv [Analysis of innovative technologies for the production of fruit chips] // *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. 2017. No. 39 (3). P. 53 – 59. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.08>. (in Ukr)
9. *Shmorhun V., Martiuk O.* Enerhetychna ta ekolohichna efektyvnist vyparuvannia ta sushinnia ridkykh produktiv v odnii vyparuvanno-sushylnii ustanovi [Energy and environmental efficiency of evaporation and drying of liquid products in a single evaporation and drying unit] // *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. P. 39 – 43. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.5>. (in Ukr)
10. *Tsvirkun L. O., Omelchenko O. V.* ta in. Doslidzhennia ta optymizatsiia protsesiv konvektyvnoho sushinnia bananiv [Research and optimization of convective drying processes for bananas] // *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv* 2024. No. 1 (48). P. 52 – 59. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2024-48-1-52-59>. (in Ukr)
11. *Huzyk D. V., Cherednikova O. V.* et al. Eksperymentalni doslidzhennia protsesiv sushinnia bananiv [Experimental studies of banana drying processes] // *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia*. 2023. Vol. 45. P. 21 – 28. (in Ukr)
12. *Sniezshkin Yu. F., Paziuk V. M., Husarova O. V.* Intensyvni metody sushinnia shmatochkiv yabluk z konvektsiieiu ta kombinovanykh enerhopostachanniam [Intensive methods of drying apple slices with convection and combined energy supply] // *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. 2024. Vol. 46 (4). P. 5 – 14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>. (in Ukr)
13. *Arun S. Mujumdar, Anilkumar S. Menon.* Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. New York: CRC Press. 2020. 30 p.
14. *Petrova Zh.O., Slobodianiuk K.S., Ivanov S.O., Hrakov O. P.* Vplyv kombinovanoho sushinnia koloidnykh kapilarnoporystykh materialiv na enerhetychni vytraty [The effect of combined drying of colloidal capillary-porous materials on energy consumption] // *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. 2023. Vol. 45 (2). P. 45 – 54. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.5>. (in Ukr)
15. *Fabiano A.N. Fernandes, Sueli Rodrigues, Chung Lim Law, Arun S. Mujumdar.* Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review // *Food and Bioprocess Technology*. 2011. Vol. 4. P. 163 – 185. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0323-7>
16. *S. Tabtiang S. Prachayawarakon, Soponronnarit S.* Effects of Osmotic Treatment and Superheated Steam Puffing Temperature on Drying Characteristics and Texture Properties of Banana Slices // *Drying Technology: An International Journal*. 2021. Vol. 30 (1). P. 20 – 28. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.613554>
17. *Macedo L. L., Araújo C., Souza Cruz D., Lima Pereira G., Saraiva S.* Applying vacuum pulse during ethanol pretreatment to enhance the drying rate and quality of fresh and osmo-dehydrated banana slices using coconut sugar // *Food Research International*. 2025. Vol. 208. P. 116115. ISSN 0963-9969. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116115>
18. *Mykhailik V. A., Sniezshkin Yu. F., Korinchevska T. V., Hornikov Yu.* Vplyv rezhymu konvektyvnoho sushinnia na krystalichnist yabluchnoho ta tsukrovoho buriakovoho poroshkiv // *Teplofizyka ta teploenerhetyka* [The effect of convective drying on the crystallinity of apple and sugar beet powders]. 2017. Vol. 37 (5). P. 23 – 37. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.03>. (in Ukr)
19. *Husarova O.V., Dabizha N.O., Malashchuk N.S., Dmytrenko N.V.* Osoblyvosti konvektyvnoho sushinnia bananiv [Features of convective drying of bananas] // *Zbirnyk tez dopovidei XX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia kharchovykh ta khimichnykh vyrobnytstv»* 9 – 13 september 2024, Odesa. 2024. P. 11 – 13. (in Ukr)

20. *Snieszkin Yu.F., Shapar R.O.* Teplomasoob-minni tekhnolohii 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).

21. *Alvarado J. de D.* Specific heat of dehydrated pulps of fruits // *Journal of Food Process Engineering*. 1991. № 14. P. 189 – 195. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00090.x>

Отримано 06.07.2025

Received 06.07.2025

Прийнято до друку 05.08.2025

Accepted for publication 05.08.2025