



Прийнято 01.02.2026. Прорецензовано 23.04.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 62-97; 519.876.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-136-144

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОЦЕС СУШІННЯ УТФЕЛЮ

Григорчук Г. В.

Доктор філософії, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1674-9828>

e-mail: grygorchuk.galyna@gmail.com

Григорчук Л. І.

Кандидат педагогічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-0924-5090>

e-mail: grygorchukl@gmail.com

Олійник А. П.

Доктор технічних наук, професор

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
76018, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1031-7207>

e-mail: andrii.oliinyk@pnu.edu.ua

Кропивницький Д. Р.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1896-9322>

e-mail: dmytro.kropyvnytskyi@nung.edu.ua

Анотація. У статті представлено комплексне теоретико-прикладне дослідження процесу сушіння утфелю — побічного продукту переробки цукрових буряків, який характеризується високим вмістом вологи та складною мікроструктурою. Процес сушіння розглянуто як багатофакторну теплофізичну систему, у якій одночасно відбуваються процеси теплопередачі, масообміну та внутрішньої дифузії вологи в матеріалі. Для опису процесу сушіння розроблено математичну модель тепломасообміну, що базується на рівняннях теплового балансу та кінетики зміни вологості матеріалу в часі. Модель дозволяє оцінювати температурні поля

Запропоноване посилання: Григорчук, Г. В., Григорчук, Л. І., Олійник, А. П. & Кропивницький, Д. Р. (2026). Аналіз впливу технологічних параметрів на процес сушіння утфелю. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 136-144. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-136-144

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

в сушильній камері, прогнозувати швидкість випаровування вологи та визначати оптимальні режими роботи установки. На основі отриманих залежностей побудовано графічні характеристики зміни температури та вологості утфелю в процесі сушіння, а також визначено залежність швидкості переміщення сировини від кута нахилу барабана. Проведене моделювання дало змогу встановити області найбільш ефективного теплового режиму, за яких досягається мінімізація енергетичних витрат при забезпеченні необхідної кінцевої вологості продукту. Запропоновано підхід до інтелектуального керування сушаркою на основі безперервного контролю вологості утфелю та адаптивного регулювання теплового потоку. Розроблений алгоритм автоматичного керування враховує зміну фізико-механічних та мікроструктурних характеристик матеріалу під час сушіння, що дозволяє підвищити точність підтримання технологічних режимів і зменшити перевитрати енергії. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих математичних моделей та алгоритмів керування для модернізації існуючих сушильних установок і розробки нових енерго-ефективних систем сушіння.

Ключові слова: утфель, сушіння, математичне моделювання, тепломасообмін, барабанна сушарка, автоматичне керування, вологість, температура, енергоефективність, мікроструктура сировини.

Вступ

При обертанні барабана сушильної установки сировина переміщується вздовж нього під дією власної текучості та сили тяжіння. Текучість сировини визначається багатьма факторами і змінюється складно. Однак швидкість її просування уздовж барабана можна регулювати шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабана, що змінює силу взаємодії між сировиною та гравітацією. Використати і контролювати швидкість руху матеріалу кут нахилу барабана та температуру повітря. Отже метою роботи буде оптимізувати фізичні параметри сушіння.

Мета роботи – полягає у розробці системи автоматичного керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням автоматичного регулювання вологості та температури вихідної сировини шляхом зміни кількості теплового і холодного сухого повітря, а також часу перебування матеріалу в сушарці за рахунок регулювання кута нахилу осі сушильного барабана.

Аналіз існуючих досліджень та публікацій

У дослідженні Yacine Chryat визначалось зменшення енергоспоживання при сушінні утфелю: моделювання інтеграції енергії між системами сушіння перегрітою парою та гарячим повітрям (2016) розглянуто комбіновану сушку цукрового жому за допомогою перегрітої пари та гарячого повітря. Моделювання показало, що така комбінація дозволяє зменшити енергоспо-

живання до 40% порівняно з традиційними сушарками, завдяки ефективнішому використанню тепла. Дана робота пропонує інший підхід – регулювання це зміна кут нахилу барабана та температури повітря, що дозволяє адаптувати процес сушіння до властивостей сировини в реальному часі. Для визначення впливу параметрів сушіння на якість продукту проводилось дослідження “Сушіння парою порівняно з барабанним сушінням значно підвищує ранню фазу ферментативної активності цукрового жому в рубці корів” Mette Olaf Nielsen, (2017) [6, 7] де порівнюється сушіння жому перегрітою парою та барабанним методом. Результати показали, що сушіння парою значно підвищує ферментативну активність жому в рубці корів. Дана робота не фокусується безпосередньо на кормовій якості, запропонована нами система автоматичного керування дозволяє точно контролювати параметри сушіння, що потенційно може впливати на якість кінцевого продукту.

У більшості попередніх досліджень оптимізація процесу сушіння здійснювалася за фіксованими технологічними параметрами, такими як температура нагріву чи швидкість обертання барабана, без врахування поточної вологості сировини у реальному часі.

Принципова новизна цієї роботи полягає у впровадженні автоматизованої системи керування процесом сушіння, яка ґрунтується на безперервному аналізі вологості сировини та динамічному регулюванні кута нахилу барабана. Такий підхід дозволяє оперативно адаптувати режим

сушіння під змінні властивості утфелю, забезпечити більш точне досягнення заданої кінцевої вологості продукту, зменшити енергетичні витрати та уникнути перегріву. Запропонований метод є кроком до впровадження інтелектуальних систем керування сушильними установками, які поєднують сенсорний моніторинг і аналітичне моделювання процесу. Особливістю роботи є те, що автоматизація здійснюється не лише за рахунок регулювання подачі тепла, а й завдяки гнучкому керуванню переміщенням сировини через зміну кута нахилу барабана, що забезпечує додаткову гнучкість і енергоефективність порівняно з класичними схемами керування.

Виклад основного матеріалу

У сучасному цукровому виробництві процес сушіння утфелю відіграє важливу роль у формуванні якісної продукції. Ефективність цього процесу залежить від низки факторів, зокрема: температури сушильного повітря, вологості сировини, тривалості сушіння, інтенсивності обдування та геометричних параметрів сушильної установки. Комплексний аналіз взаємозв'язків між цими параметрами дозволяє створювати математичні моделі для прогнозування та керування процесом. Є декілька параметрів, які впливають на кінцеву кількість питомої вологи в сировині. Такими параметрами, при незмінній питомій вологості сировини, є час сушіння, температура нагрівника, об'єм повітря обдування, його вологість, конструкція системи обдування.

Оскільки нагрівання сировини здійснюється потоком сухим, теплим повітрям, то температура повітря впливає одразу на два параметри: інтенсивність виділення вологи з міжкристалічного простору і адсорбуючої властивості повітря. При незмінній конструкції сушильної системи із фіксованою масою осушеної сировини змінними параметрами залишаються час сушіння, температура повітря, вологість повітря до взаємодії з сировиною, об'єм повітря.

Сушіння великих об'ємів утфелю здійснюється за допомогою барабанної су-

шильної установки. Її конструкція передбачає нагрівання сировини поданим ззовні теплим повітрям а також перемішування сировини в процесі сушіння для збільшення площі взаємодії кристалів із теплим сухим повітрям [1].

Система автоматичного керування процесом сушіння утфелю в барабанній сушильній установці дозволяє зменшити витрати енергії на сушіння за рахунок оптимального підбору часу перебування сировини в сушильному барабані шляхом керування положенням осі обертання цього барабана. Впровадження енергоефективних систем сушіння дозволяє зменшити споживання палива, скоротити викиди CO₂ і знизити витрати підприємств

Розглянемо алгоритм автоматичного керування сушінням утфелю. Система автоматичного керування барабанною сушильною установкою розроблена для підтримки оптимального рівня вологості сировини на виході. Основними елементами автоматизації є сучасні сенсорні датчики, мікроконтролерна система та виконавчі механізми для зміни подачі теплового повітря і регулювання кута нахилу барабана.

Для вимірювання технологічних параметрів розглянемо:

– датчики вологості сировини: емнісні або резистивні датчики, розміщені у зоні виходу утфелю з барабана. Він забезпечує безперервне зчитування значень вологості сировини в реальному часі;

– датчики температури: термопари типу К або цифрові температурні сенсори (наприклад, DS18B20), встановлені на вході і виході повітряного потоку;

– датчик кута нахилу барабана: інкліно- або енкодерний датчик, який фіксує положення осі барабана.

У системі автоматичного керування регулюється подача теплового повітря і положення барабана на основі поточних вимірювань вологості сировини.

В процесі сушіння сировини проводяться наступні дії:

– вимірюється поточна вологість ($W_{(вих.)}$);

– обчислюється похибка $e(t) = W_{(зад.)} - W_{(вих.)}$.

– коригуючий сигнал керує подачею теплого повітря і кутом нахилу барабана.

Виконавчі механізми регулюють: кількість теплого повітря, кут нахилу барабана, швидкість обертання. Додатково контролюється: температура повітря, швидкість обертання барабана, об'ємна витрата повітря. Для аналізу залежності між параметрами процесу сушіння утфелю, проведемо дослідження взаємозв'язків між:

– температурою сушильного повітря (Т);

– вологістю сировини (W);

– швидкістю випаровування вологи (E)⁴

– часом перебування матеріалу в сушильній камері (t).

Для цього створим диференціальну модель процесу сушіння утфелю, Процес сушіння опишемо рівняннями масо- та теплообміну. Дане рівняння визначає швидкість випаровування вологи з утфелю [2,4,5]:

$$dW/dt = -k(W - W_{\text{рівн}}), \quad (1)$$

де W – поточна вологість утфелю,

$W_{\text{рівн}}$ – рівноважна вологість матеріалу,

k – коефіцієнт масо передачі, що залежить від температури та швидкості повітря.

Для визначення зміни температури сушильного повітря розглянемо наступне рівняння

$$dT/dx = -(L \cdot E) / (C_p \cdot G), \quad (2)$$

де T – температур повітря,

x – координата вздовж сушарки,

L – прихована теплота випаровування води,

E – швидкість випаровування вологи,

C_p – теплоємність повітря,

G – масова витрата повітря.

Рівняння (2) визначає тепловий баланс для повітряного потоку, що описує зміну температури вздовж сушарки внаслідок витрати тепла на випаровування вологи з утфелю. Час перебування сировини у сушильному барабані визначається за формулою:

$$t = L / (k \cdot \omega \cdot \sin(\alpha)), \quad (3)$$

де t – час перебування сировини в сушарці, c (секунди);

L – довжина сушильного барабана, м (метри);

k – коефіцієнт, що враховує геометричні та технологічні характеристики переміщення матеріалу (безрозмірна величина);

ω – кутова швидкість обертання барабана, рад/с (радіани за секунду);

α – кут нахилу осі барабана до горизонталі, градуси або радіани.

Покажемо графік залежності між параметрами: температури сушильного повітря залежно від вологості сировини і впливу часу сушіння на швидкість випаровування. Даний графік демонструє експоненційне зменшення вологості сировини протягом сушіння. Ось X: час сушіння у хвилинах. Ось Y: вологість сировини у відсотках (%). Графік відповідає типовій поведінці сировини під час теплової обробки.

Графік на рис. 2 відображає зміну температури сушильного повітря в залежності від поточної вологості сировини. Ось X: вологість сировини (%). Ось Y: температура повітря (°C). Таке представлення дає змогу оцінити ефективність нагріву в умовах змінної вологості. Прикладна залежність температури повітря залежно від вологості сировини показує, що при зменшенні вологості сировини з 30% до 10% температура повітря падає приблизно з 90°C до 72°C – типова ситуація для сушіння утфелю. Ця пряма ілюструє основний фізичний зв'язок: чим менше залишкової вологи в продукті, тим менше тепла потрібно для подальшого випаровування, і температура повітря падає.

Проведемо аналіз отриманих результатів. На рис. 1 бачимо, що зміна вологості сировини зменшується в часі за експоненційним законом. На початку процесу волога випаровується швидше, а згодом швидкість випаровування зменшується. Випаровування відбувається найінтенсивніше на початку (коли вологи багато – вона легко йде). Зі зменшенням залишкової вологи процес стає повільнішим – все важче “витягнути” вологу, бо вона або пов'язана капілярно, або знаходиться глибоко всередині частинок сировини (1).

На рис. 2 температура сушильного повітря знижується зі зменшенням вологості

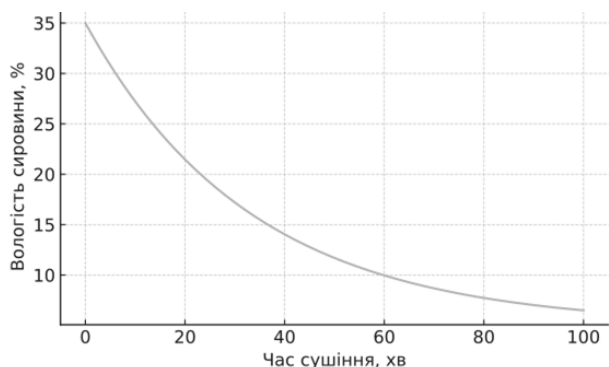


Рисунок 1 – Зміна вологості сировини у часі

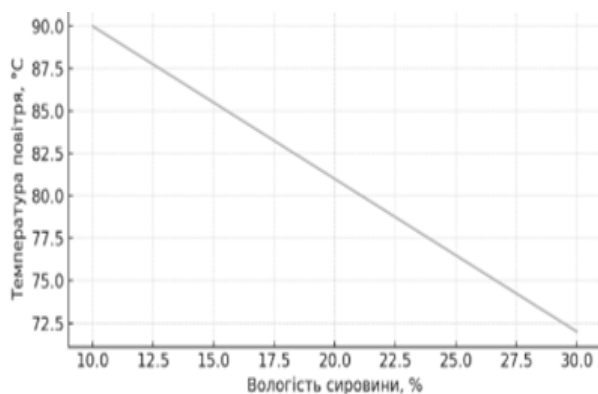


Рисунок 2 – Температура повітря залежно від вологості сировини

сировини. Це пояснюється тим, що випаровування вологи потребує тепла яке забирається з повітря. Отримаємо наступні практичні висновки:

- для підвищення ефективності сушіння варто контролювати швидкість руху матеріалу та температуру повітря;
- можна автоматизувати подачу тепла залежно від поточної вологості, щоб уникнути перегріву або зайвих енергетичних витрат.

Температура повітря залежно від вологості сировини показує, що зі зменшенням вологості сировини падає й температура повітря (лінійний спад). Частина теплоти витрачається на фазовий перехід (на випаровування), тому температура повітря витрачається.

Для зменшення впливу нерівномірності потоку вихідної сировини на датчик вологості, розроблено авто регресійний фільтр із коефіцієнтом згладжування, залежним від напрямку зміни вхідного сигналу.

Розділення двох виконавчих механізмів, які впливають на вологість вихідної сировини здійснюється за допомогою нелінійних функціональних залежностей, які формують різні сигнали помилки системи керування. Це дозволило компенсувати відмінності в швидкості роботи виконавчих механізмів і підвищило стабільність роботи системи автоматичної керування вологістю вихідної сировини. Під час проведення досліджень застосовано конструкцію барабанної сушарки, розроблену авторами, яка запатентована у патенті України №127513 [1]. Винахід дозволяє змінювати кут нахилу барабана для регулювання швидкості руху матеріалу, що підвищує гнучкість системи керування сушінням.

Для проведення аналізу залежності температури сушильного повітря від вологості сировини розглянемо кут нахилу барабанної труби і швидкість теплого повітря. Температура повітря, що подається в сушарку, повинна адаптуватися до початкової вологості утфелю. При високій вологості потрібна більша кількість теплоти для випаровування, отже, температура повітря має бути вищою. Такий зв'язок може бути описаний через рівняння теплового балансу, що враховує тепло, витрачене на нагрівання сировини і випаровування вологи. Визначимо температуру сушильного повітря як функція вологості сировини і визначимо модель теплового балансу:

$$T = f(W), \quad (4)$$

де W – вологість сировини.

Тобто температура сушильного повітря є функцією вологості сировини. Швидкість випаровування зменшується зі зменшенням вологості та підвищенням температури матеріалу. На початку сушіння швидкість є максимальною, однак із часом вона зменшується. Це відображається в моделі і визначає швидкість зміни вологості залежить від часу:

$$dW/dt=f(t). \quad (5)$$

Дане рівняння показує, що залежність є критичною для визначення оптимальної тривалості процесу. Визначимо вплив кута нахилу барабана на час сушіння утфелю. Час перебування сировини у сушарці залежить від кута нахилу осі барабана. При

збільшенні кута нахилу утфелю швидше переміщується, скорочуючи час сушіння. Цей зв'язок згідно (3) описується рівнянням:

$$v = k \cdot \omega \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

де v – швидкість сировини,

t – час перебування сировини в сушарці і визначається:

$$t = L/v. \quad (7)$$

Швидкість переміщення утфелю вздовж барабана моделюється як функція кута нахилу установки. Вона прямо пропорційна добутку кутової швидкості обертання барабана та синуса кута нахилу. Це дозволяє за допомогою зміни кута α регулювати тривалість перебування сировини у зоні сушіння, що є ключовим фактором для досягнення необхідної вологості продукту на виході.

На рисунку 3. зображено залежність швидкості переміщення сировини від кута нахилу барабана в межах 1–15°. Графік показує залежність швидкості переміщення сировини від кута нахилу барабана.

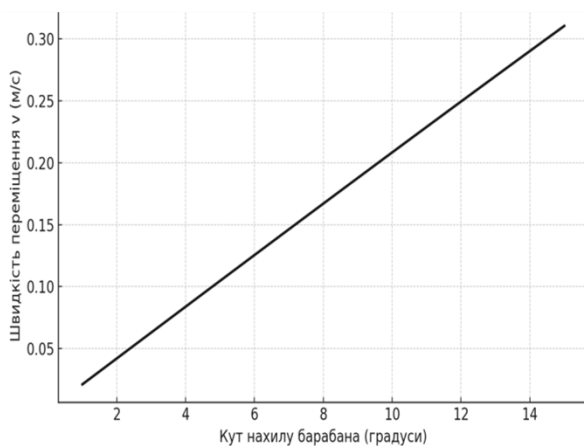


Рисунок 3 – Зміна кута нахилу барабана

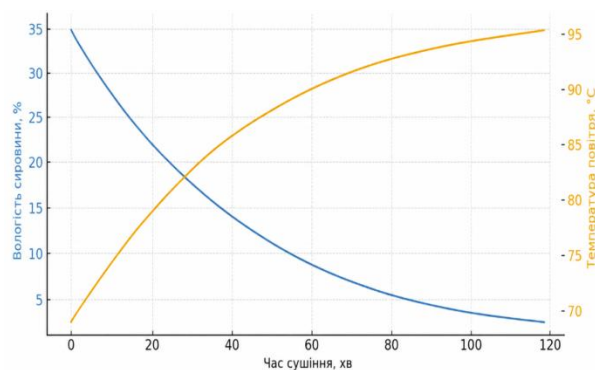


Рисунок 4 – Динаміка вологості сировини та температури повітря, під час сушіння

Видно, що навіть невелике збільшення кута значно впливає на швидкість просування утфелю – це важливо враховувати при автоматичному регулюванні сушіння сировини.

Розглянемо графік, що ідеально підходить для ілюстрації динамічного взаємозв'язку обох параметрів у процесі сушіння та зручно сприймається реципієнтами. Це комбінований графік, що відображає дві криві на одному полі, різні осі Y. Синя крива (ліва вісь Y) – вологість сировини, %: експоненційно зменшується з часом. Помаранчева крива (права вісь Y) – температура повітря, °C: лінійно знижується з часом. X-вісь – це час сушіння, хвилини. На початковому етапі сушіння температура повітря на виході з сушарки є мінімальною через значні втрати теплоти на випаровування великої кількості вологи. У міру зменшення вологості сировини, зменшуються і витрати теплоти на фазовий перехід, відповідно температура повітря на виході поступово зростає.

Новизна роботи полягає показати залежність температури, кута нахилу барабана, та часу сушіння утфелю щоб уникнути зайвих енергетичних витрат [12].

Висновки

Для підвищення ефективності сушіння потрібно контролювати швидкість руху матеріалу та температуру повітря. При потребі можна автоматизувати подачу тепла залежно від поточної вологості сировини, щоб уникнути перегріву або зайвих енергетичних витрат.

Запропонована методика регулювання технологічного процесу сушіння утфелю за допомогою автоматичного керування кутом нахилу барабана та температурою сушильного повітря відповідає сучасним тенденціям індустрії 4.0 та цифрової трансформації харчової промисловості. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити енергоефективність, забезпечити гнучкість та адаптивність сушильного обладнання до зміни властивостей сировини у реальному часі, що підтверджується сучасними дослідженнями у сфері автоматизації та машин-

ного навчання для оптимізації технологічних процесів [1–5].

Проведено аналіз впливу вологості, часу та кута нахилу на ефективність сушіння утфелю. Запропоновані математичні моделі дозволяють адаптувати параметри сушіння під конкретні умови роботи та покращити енергетичну ефективність.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Барабанна сушарка : пат. 127513 С2 Україна : МПК F26В 11/04 (2006.01). № а202105416 ; заявл. 24.09.2021 ; опубл. 14.09.2023, Бюл. № 37.
2. Сидоренко О. М., Гончаренко В. І. Тепломасообмін у процесах сушіння. Київ : Наук. думка, 2017. 280 с.
3. Лебедев А. Т. Теорія і практика сушіння харчових продуктів. Харків : УкрФТІ, 2020. 312 с.
4. Kreith F., Manglik R. M., Bohn M. S. Principles of heat transfer. Cengage Learning, 2011.
5. Mujumdar A. S. Handbook of industrial drying. CRC Press, 2014.
6. Petryk M. R., Boyko I. V., Petryk O. Ju., Fraissard J. Mathematical modeling of competitive adsorption and desorption of gases in nanoporous media using Langmuir's equilibriums. *Bulletin of the NTUU KPI, Applied Mathematics*. 2020. <https://doi.org/10.31861/bmj2023.02.06>
7. Deineka V. S., Petryk M. R., Fraissard J. Identifying kinetic parameters of mass transfer in components of multicomponent heterogeneous nanoporous media of a competitive diffusion system. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011.
8. Goyanyuk I. V., Petryk M. R., Mudryk I. Y. Modeling of filtration mass transfer in the medium of microporous particles. *Automation, Computer Science and Engineering Journal*. 2022.
9. Mujumdar A. S. Recent developments in drying and dewatering of food products: advances and challenges. *Drying Technology*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2028724>
10. Cubero F., Barreiro A. P., Blasco M. R. Smart sensors for food drying process control. *Sensors (Basel)*. 2020. URL: <https://doi.org/10.3390/s20010045>
11. Shah S. A. et al. Application of machine learning in the optimization of drying processes. *Processes*. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9112038>
12. Shakeri M. et al. Industry 4.0 applications in drying processes: a review. *Journal of Food Engineering*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110512>
13. Silva M. A. et al. Adaptive control strategies for drum dryers in food processing. *Food Control*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.019>

References

1. *Barabanna susharka* [Drum dryer] (Ukraine Patent No. 127513 C2). (2023). State Intellectual Property Service of Ukraine. (in Ukrainian)
2. Sydorenko, O. M., & Honcharenko, V. I. (2017). *Teplomasoobmin u protsesakh sushinnia* [Heat and mass transfer in drying processes]. Naukova Dumka. (in Ukrainian)
3. Lebediev, A. T. (2020). *Teoriia i praktyka sushinnia kharchovykh produktiv* [Theory and practice of food drying]. UkrFTI. (in Ukrainian)

4. Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2011). *Principles of heat transfer*. Cengage Learning.
5. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying*. CRC Press.
6. Petryk, M. R., Boyko, I. V., Petryk, O. Ju., & Fraissard, J. (2020). Mathematical modeling of competitive adsorption and desorption of gases in nanoporous media using Langmuir's equilibriums. *Bulletin of the NTUU KPI, Applied Mathematics*. <https://doi.org/10.31861/bmj2023.02.06>
7. Deineka, V. S., Petryk, M. R., & Fraissard, J. (2011). Identifying kinetic parameters of mass transfer in components of multicomponent heterogeneous nanoporous media of a competitive diffusion system. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*.
8. Goyanyuk, I. V., Petryk, M. R., & Mudryk, I. Y. (2022). Modeling of filtration mass transfer in the medium of microporous particles. *Automation, Computer Science and Engineering Journal*.
9. Mujumdar, A. S. (2022). Recent developments in drying and dewatering of food products: advances and challenges. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2028724>
10. Cubero, F., Barreiro, A. P., & Blasco, M. R. (2020). Smart sensors for food drying process control. *Sensors*, 20(1), Article 45. <https://doi.org/10.3390/s20010045>
11. Shah, S. A., & et al. (2021). Application of machine learning in the optimization of drying processes. *Processes*, 9(11), Article 2038. <https://doi.org/10.3390/pr9112038>
12. Shakeri, M., & et al. (2021). Industry 4.0 applications in drying processes: a review. *Journal of Food Engineering*, Article 110512. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110512>
13. Silva, M. A., & et al. (2019). Adaptive control strategies for drum dryers in food processing. *Food Control*, Article 106301. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.019>

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE DRYING PROCESS OF SOLID FOAM

Hrygorchuk G. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1674-9828>
e-mail: grygorchuk.galyna@gmail.com

Hrygorchuk L. I.

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0924-5090>
e-mail: grygorchukl@gmail.com

Oliinyk A. P.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
76018, 57 Shevchenko St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1031-7207>
e-mail: andrii.oliinyk@pnu.edu.ua

Kropyvnytskyi D. R.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1896-9322>
e-mail: dmytro.kropyvnytskyi@nung.edu.ua

Abstract. The article presents a comprehensive theoretical and applied study of the process of drying massif, a by-product of sugar beet processing, which is characterized by a high moisture content and a complex microstructure. The drying process is considered as a multifactorial thermophysical system in which the processes of heat transfer, mass transfer, and internal diffusion of moisture in the material simultaneously occur. To describe the drying process, a mathematical model of heat and mass transfer has been developed, based on the equations of heat balance and kinetics of changes in material moisture content over time. The model allows us to estimate temperature fields in the drying chamber, predict the rate of moisture evaporation, and determine the optimal operating modes of the unit. Based on the obtained dependencies, graphical characteristics of changes in massif temperature and moisture content during the drying process have been constructed, and the dependence of the raw material movement speed on the angle of inclination of the drum has been determined. The modeling made it possible to establish the areas of the most effective thermal regime, in which energy costs are minimized while ensuring the required final product moisture content. An approach to intelligent dryer control based on continuous masseccuite moisture control and adaptive heat flow regulation is proposed. The developed automatic control algorithm takes into account the change in the physical, mechanical and microstructural characteristics of the material during drying, which allows to increase the accuracy of maintaining technological modes and reduce energy over-consumption. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using the proposed mathematical models and control algorithms to modernize existing drying plants and develop new energy-efficient drying systems.

Keywords: masseccuite, drying, mathematical modeling, heat and mass transfer, drum dryer, automatic control, humidity, temperature, energy efficiency, raw material microstructure.