

Григорчук Г. В.

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

Григорчук Л. І.

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

Храбатин Р. І.

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ УТФЕЛЮ

У статті розглянуто процес сушіння утфелю як один із ключових етапів технологічного циклу цукрового виробництва, який суттєво впливає на якість кінцевої продукції та енергоефективність усього процесу. Виконано математичне моделювання процесу тепломасообміну в барабанній сушильній установці, що дозволяє врахувати зміну температури, вологості сировини, швидкості її переміщення та інтенсивності обдування повітрям. Запропоновано систему диференціальних рівнянь, що описують динаміку зміни основних параметрів процесу сушіння, а також рівняння теплового балансу, яке дає змогу визначити залежність температури сушильного повітря від поточної вологості утфелю. Проведено графічне моделювання, яке демонструє зміну цих параметрів у часі та дає можливість здійснювати оптимізацію режимів сушіння відповідно до вимог енергоощадності й стабільності роботи обладнання. Запропонована модель дозволяє адаптувати систему автоматизованого керування сушильним процесом, що може бути реалізована на основі сучасних мікропроцесорних засобів з підтримкою зворотного зв'язку. Використання запропонованого підходу дає змогу значно покращити контроль температури та вологості, зменшити втрати цукру та забезпечити стабільну роботу цукрового заводу в умовах змінного навантаження та різної якості сировини.

Ключові слова: осушування утфелю, сировина, барабанна сушильна установка, регулювання вологості, тепле повітря.

Постановка проблеми. Сушіння утфелю залежить від здатності повітря поглинути і відвести вологу а також часу взаємодії сировини із теплим сухим повітрям. При обертанні барабану сушильної установки сировина переміщається по ній зі швидкістю, яка залежить від своєї текучості і під дією сил тяжіння. Текучість залежить від багатьох факторів, тому її змінювати складно. Змінювати швидкість просування сировини вздовж барабану можна змінюючи взаємодію сировини із силою тяжіння, шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану установки. Постає питання, як ефективно інтегрувати процес сушки сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі представлено низку досліджень, присвячених термічним процесам, зокрема сушінню, у цукровій промисловості. У роботі Свинчак У.В. (2020) досліджено кінетику уварювання утфелю та модернізацію вакуум-випарного обладнання, що є важливою підготовчою стадією до сушіння. Значну увагу

автоматизації та моделюванню теплотехнічних процесів у цукровій галузі приділено в дисертації Григорчук Г.В. (2022) [1], яка розробила адаптивні моделі керування об'єктами барабанного типу. Подібні підходи можуть бути використані для вдосконалення системи сушіння утфелю.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена відсутністю цілісної моделі сушіння утфелю як специфічної цукрової маси з особливими фізико-хімічними властивостями.

Постановка завдання. Метою дослідження є впровадження систем автоматизації технологічних процесів цукрових заводів на основі витратимірів і рівнемірів різних типів, що дозволить істотно скоротити енергоспоживання, зменшити втрати цукру і поліпшити якість продукту, що випускається.

Виклад основного матеріалу. Автоматизація виробничого та технологічного процесів повинні розглядатись як з точки зору вдосконалення устаткування, технологічного оснащення і якості процесу,

так і з точки зору забезпечення техніко-економічної ефективності. Розглянемо цукрову промисловість з точки зору удосконалення роботи технологічного процесу забезпечення сушки утфелю.

Автоматизація цукрової промисловості забезпечує якісну, ефективну роботу всіх технологічних ділянок цукрового заводу тільки за допомогою комплексного підходу до рішення даної задачі.

Первинні перетворювачі і прилади з високими експлуатаційними характеристиками, використовувані в автоматичній системі управління технологічних процесів (АСУ ТП), дають можливість мати достовірні значення контрольованих параметрів технологічного процесу, роблять системи автоматизації функціонально завершеними і високонадійними.

Технологічний комплекс підприємства цукрової промисловості складається з ділянок приймання, зберігання, підготовки сировини до переробки, відділень отримання соку, очищення дифузійного соку, ділянок отримання готового продукту, допоміжного виробництва, зберігання, переробки цукру-сирцю. І на кожній з цих ділянок контроль витрат або рівня є одним з найважливіших завдань [1].

Так, наприклад, в дифузійній установці необхідно контролювати: рівень суміші «стружка + гаряча вода» в чотирьох зонах похилого дифузійного апарату; рівень буряків в завантажувальному бункері; рівень в ємності дифузійного соку; витрата гарячої води в дифузійному апараті.

На станції дефекосатурації необхідний контроль: витрати соку на випарку; витрати і щільності вапняного молока; витрати дифузійного соку і вапняного молока в бригель Мюллера; рівень дифузійного соку в холодному і гарячому дефекаторах. Контроль цих параметрів так само важливий на випарній станції, вакуум-апараті, і інших ділянках [5].

Впровадження систем автоматизації технологічних процесів цукрових заводів на основі витратомірів і рівнемірів різних типів дозволить істотно скоротити енергоспоживання, зменшити втрати цукру і поліпшити якість продукту, що випускається.

Розглянемо запропоновану нами структурну схему системи осушування утфелю. Цукор містить зволожені кристали. Видалення вологи проходить шляхом випаровування. Волога в газоподібному виді відводиться в повітря. Відведення вологого повітря здійснюється примусовим обдуванням. Для інтенсифікації процесу випаровування повітряний потік має вищу температуру за сировину.

При контакті повітря з сировиною частина енергії передається сировині. З нагрітої сировини волога випаровується інтенсивніше. В нагріте повітря піднімається більша частка вологи ніж в холодне. Однак нагріта сировина гірше зберігається. Кількість випарованої вологи залежить від інтенсивності виділення вологи на поверхні кристалів сировини, адсорбуючої властивості оточуючого повітря і часу взаємодії вологи на поверхні із осушуючим повітряним потоком. Виділення вологи залежить від температури (яка впливає на в'язкість вологи), глибини і розміру пор (розміру каналів по яких волога піднімається на поверхню) кристалів та площі волого відведення (розміру кристалів) [1].

Адсорбуюча властивість повітря залежить від його вологості і температури.

При сушінні кристалів інтенсифікують виділення вологи нагрівом, перемішуванням, подрібненням. Адсорбуючу властивість інтенсифікують нагрівом, обдуванням.

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 осушуваної 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 сушильної 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.

Тепле сухе повітря здійснює нагрівання сировини, що інтенсифікує процес поглинання вологи. Крім того потік повітря після обтікання сировини і поглинання вологи виносить її на зовні. Кількість повітря, яке поступає в сушильний барабан прямо впливає на інтенсивність висушування.

Час сушіння залежить від здатності повітря поглинути і відвести вологу а також часу взаємодії сировини із теплим сухим повітрям. При обертанні барабану сушильної установки сировини

вина переміщається по ній зі швидкістю, яка залежить від своєї текучості і під дією сил тяжіння. Текучість залежить від багатьох факторів, тому її змінювати складно. Змінювати швидкість просування сировини вздовж барабану можна змінюючи взаємодію сировини із силою тяжіння, шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану установки.

Отже при достатній адсорбуючій здатності теплого сухого повітря і досягненні заданої вологості вихідної сировини може бути змінений час перебування цієї сировини в сушильному барабані. Зменшення часу перебування сировини в барабані зменшить витрату енергії на проведення сушіння.

Нагріта і осушена сировина має охолотитися перед зберіганням. Охолодження відбувається потоком холодного сухого повітря до заданої температури. Таким чином для роботи системи використовується три контури керування (5).

1. Підтримання заданої вологості вихідної сировини шляхом керування питомим часом перебування сировини в барабані.

2. Підтримання заданої вологості вихідної сировини шляхом керування інтенсивністю потоку нагрітого повітря.

3. Підтримання заданої температури висушеного середовища на виході барабану шляхом керування інтенсивністю охолоджуючого повітря.

Розглянемо оптимізація процесу сушіння сировини в барабанній сушильній установці. 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. Після нагрівання та осушення сировина повинна охолотитися перед зберіганням. Це охолодження відбувається за допомогою потоку холодного сухого повітря, який доводить матеріал до заданої температури. Таким чином, робота системи контролюється трьома основними контурами керування:

- регулювання вологості сировини шляхом зміни питомого часу перебування матеріалу в барабані;
- контроль вологості на виході шляхом регулювання інтенсивності потоку нагрітого повітря;
- підтримання необхідної температури висушеного матеріалу через зміну інтенсивності потоку охолоджуючого повітря.

При фіксованій конструкції сушильної системи та незмінній масі сировини, головними регульованими параметрами залишаються:

- час сушіння,
- температура повітря,
- вологість повітря до взаємодії з матеріалом,
- об'єм повітряного потоку.

Час сушіння залежить від здатності повітря поглинати та відводити вологу, а також від тривалості контакту сировини з нагрітим сухим повітрям.

Вологість сировини на виході з барабана визначається тривалістю взаємодії з осушуючим повітрям та інтенсивністю обдуванням.

Структурна схема системи регулювання заданої вологості сировини наведена на рис. 1.

Процес роботи барабанної сушильної установки можна описати диференціальними рівняннями, які враховують зміну вологості сировини, температури повітря, часу сушіння та швидкості просування матеріалу. Розглянемо рівняння, що описує зміну вологості повітря вздовж барабана. Даний процес називають масообміном. Рівняння показує зміну вологості W від швидкості руху сировини $v(x)$ та випаровування $H(x, t)$ (1).

$$\frac{\partial W}{\partial t} + v(x) \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = -H(x, t). \quad (1)$$

Позначимо змінні процесу:

- $W(x, t)$ – вологість сировини у точці x барабана в момент часу t ;
- $T(x, t)$ – температура повітря у точці x барабана в момент часу t ;
- $v(x)$ – швидкість руху сировини вздовж барабана;
- $h(x, t)$ – інтенсивність теплообміну між повітрям і сировиною;
- $H(x, t)$ – інтенсивність масообміну (швидкість випаровування вологи).

Зміну температури повітря при теплообміні повітря і сировини опишемо наступним чином:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -h(x, t) \cdot (T - T_s), \quad (2)$$

де T_s – температура сировини.

В процесі масообміну температура повітря зменшується при передачі тепла сировині. Визначимо залежність випаровування води від температури середовища і вологості сировини:

$$H(x, t) = k \cdot (W - W_{eq}) \cdot e^{\frac{-E}{RT}}. \quad (3)$$

Щоб показати залежність поданої температури для сушіння утфелю від вологості сировини

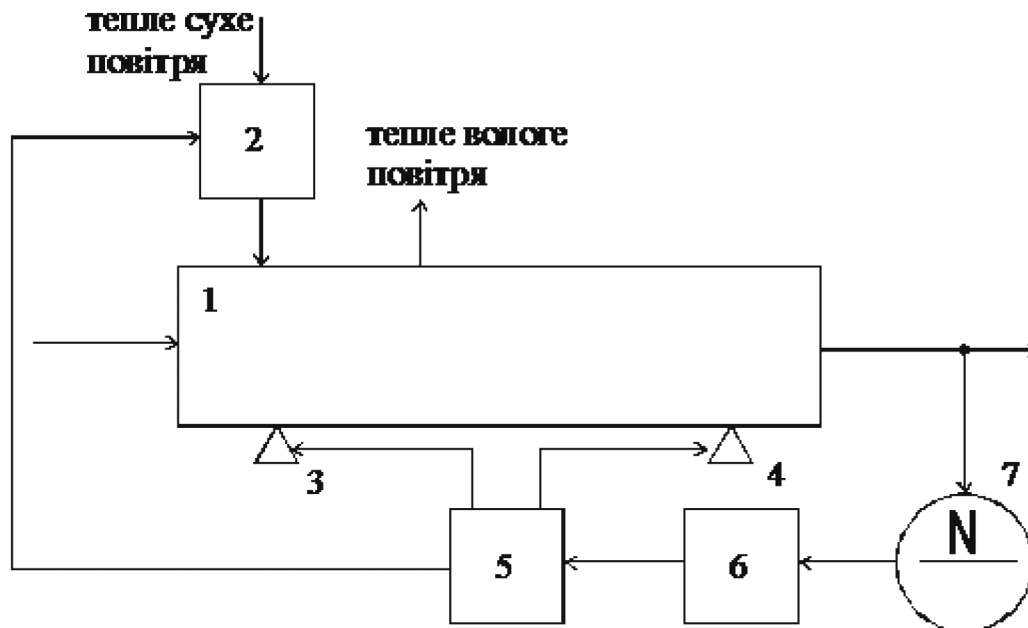


Рис. 1. Структурна схема регулювання вологості сировини на виході сушильної установки

вини, можна використати диференціальне рівняння теплового балансу з урахуванням процесу випаровування вологи. При сушінні утфелю частина тепла йде на нагрівання сировини, а частина – на випаровування вологи. Рівняння теплового балансу буде мати вигляд:

$$h(T_p - T_s) = C_s \cdot \frac{dT}{dt} + C_w \cdot W \frac{dT_s}{dt} + L \cdot \frac{dW}{dt}, \quad (4)$$

де T_p – температура сушильного повітря (°C); W – вологість сировини (кг вологи / кг сухої речовини); T_s – температура сировини (°C); $H(W)$ – швидкість випаровування вологи; C_s – питома теплоємність сировини (Дж/(кг · °C)); C_w – питома теплоємність води (Дж/(кг · °C)); L – питома теплота випаровування вологи (Дж/кг); h – коефіцієнт теплообміну між гарячим повітрям і сировиною.

В даному рівнянні теплового балансу ліва частина визначає передачу тепла від сушильного повітря до сировини. Перша частина правої частини – тепло, що йде на нагрівання сировини. Друга частина – тепло на нагрівання вологи всередині сировини. Третя частина – тепло, що необхідно використати для випаровування вологи.

Отже для визначення температури сушильного повітря і отримання відповідного результату при початкових даних вологості сировини отримаємо наступне рівняння: Це рівняння (5) є енергетичним балансом для процесу сушіння і описує температуру повітря на виході з сушарки через інші параметри процесу.

$$T_p = T_s + \frac{C_s + C_w W}{h} \cdot \frac{dT_s}{dt} + \frac{L}{h} \cdot \frac{dW}{dt}. \quad (5)$$

Для визначення залежності між температурою сушильного повітря розв'яжемо дане диференціальне рівняння (фрагменти коду) і побудуємо графік відповідності. Нижче наведено початкові умови і фрагменти коду

#Параметри сушіння

Cs = 1500 Дж/(кг·°C) - питома теплоємність сировини

Cw = 4186 Дж/(кг·°C) - питома теплоємність води

L = 2260000 Дж/кг - питома теплота випаровування води

h = 100 Вт/(м²·°C) - коефіцієнт теплообміну

Ts = 30 #Початкова температура сировини (°C)

W0 = 0.5 Початкова вологість (кг води/кг сухої сировини)

Wfinal = 0.1 Кінцева вологість

Час моделювання (у хвилинах)

t_span = [0, 60]

t_eval = np.linspace(t_span[0], t_span[1], 100)

Диференціальне рівняння для температури сушильного повітря

def drying_process(t, y):

T_s, W = y

dW_dt = -0.005 * (W - 0.1) # Емпірична

модель випаровування

dT_s_dt = (h * (T_s + 50 - T_s) - L * dW_dt) / (c_s + c_w * W)

return [dT_s_dt, dW_dt]

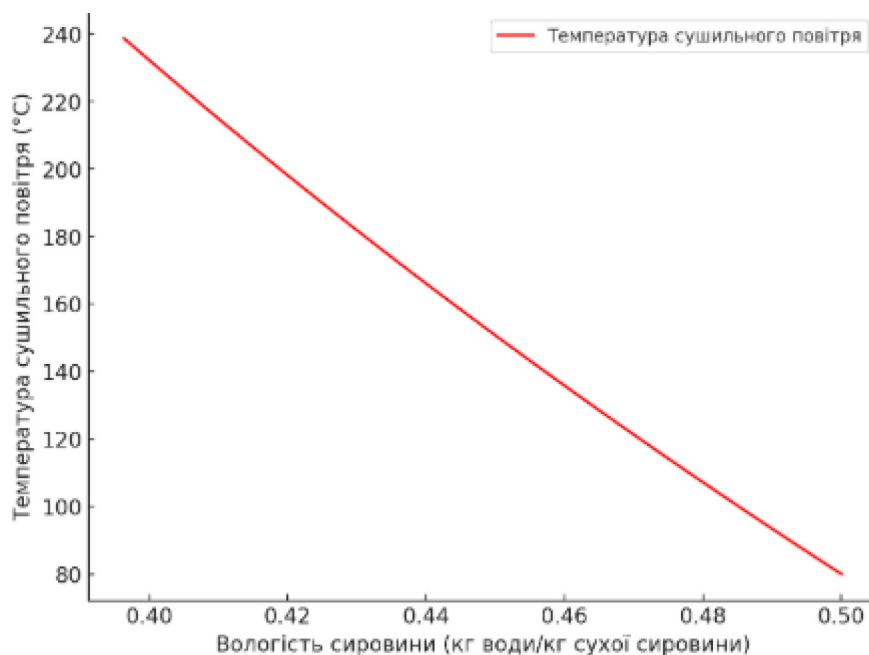


Рис. 2. Залежність поданої температури для сушіння сировини

```
# Розв'язання рівняння
sol = solve_ivp(drying_process, t_span, [T_s0, W0], t_eval=t_eval)
# Отримані дані
T_s_values = sol.y[0] # Температура сировини
W_values = sol.y[1] # Вологість сировини
T_p_values = T_s_values + (c_s + c_w *
W_values) / h * np.gradient(T_s_values,
t_eval) + L / h * np.gradient(W_values, t_
eval)
```

В результаті на графіку показано залежність поданої температури для сушіння утфелю в залежності від вологості сировини.

Згідно даного графіка бачимо, що по осі ox – показана зміна вологості сировини (від 0.5 до 0.1 кг води/кг сухої сировини). По осі oy – показано зміну температуру сушильного повітря (°C). Крива зміни температури показує, як потрібно

коректувати температуру сушильного повітря при зміні вологості сировини. На початку сушіння ($W \approx 0.5$) потрібна вища температура, бо випаровується більше води. При зниженні вологості ($W \rightarrow 0.1$) температура теж зменшується, щоб уникнути пересушування сировини.

Висновки. Результати дослідження показують, що чим вища початкова вологість сировини, тим вищою повинна бути температура сушильного повітря, щоб забезпечити ефективне випаровування вологості та сушки цукру.

Температура повітря залежить від швидкості випаровування і теплоємності сировини. При зменшенні вологості, потрібно поступово знижувати температуру, щоб уникнути пересушування утфелю.

Для покращення роботи сушильного барабана в подальшому розглянемо вплив швидкості сухого повітря від зміни кута нахилу барабана.

Список літератури:

1. Григорчук Г.В. Методи та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах. Дисертація. 151, Івано-Франківськ., 2021. 162 с.
2. Суслів В.І. Основи технології сушіння харчових продуктів. – Харків : ХДУХТ, 2010. 256 с.
3. Бабак В.П. Тепломасообмін у технологічних процесах. К. : Либідь, 2014. 288 с.
4. Шутюк В.В., Левківська Т.М., Душак О.В., Рубанка К.В., Бессараб О.С., Бут С.А. Технології сушіння: навч. посіб. Київ : НУХТ; АртЕк, 2024. 355 с.
5. Grygorchuk G., Grygorchuk L., Bandura V., Tsareva O. Study of the efficiency of automatic control systems // Věda a perspektivy. 2024. № 6(37). P. 258–265. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-6\(37\)-c.258-265](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-6(37)-c.258-265).
6. Foust A.S., Wenzel L.A., Clump C. W., Maus L., Andersen L. B. Principles of Unit Operations. 2nd ed. New York : Wiley, 2008. 768 p.
7. Kudra T., Mujumdar A. S. Advanced Drying Technologies. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 320 p.
8. Keey R. B. Fundamentals of Industrial Drying. – New York: Springer, 2012. 280 p.

**Grygorchuk G.V., Grygorchuk L.I., Khrabatyn R.I. MODELING
OF THE MASSECUITE DRYING PROCESS**

The article presents a detailed analysis of the massecuite drying process as a critical stage in the technological cycle of sugar production, significantly affecting the final product quality and overall energy efficiency. A mathematical model is developed to describe the heat and mass transfer within a drum drying system, taking into account variations in temperature, raw material moisture content, product flow rate, and airflow intensity. A system of differential equations is proposed to describe the dynamic behavior of the process parameters, along with a heat balance equation that defines the relationship between the drying air temperature and the current moisture level in the massecuite. The model also includes graphical simulations showing time-dependent changes, allowing the optimization of drying modes in terms of energy conservation and process stability. The approach offers the possibility of integrating the model into an automated control system based on modern microprocessor technology with real-time feedback. This enables improved control over drying temperature and moisture, reduces sugar losses, and enhances the reliability of sugar plant operations under varying loads and raw material quality. The proposed method supports the development of intelligent process control systems to meet the current demands of the sugar industry in terms of efficiency and product consistency.

Key words: massecuite, drying, mathematical modeling, moisture, temperature, heat balance, automation, sugar industry.