

Фесенко А.М.

Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

E-mail:

alla.ecology3006@gmail.com

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ
ВИПАРЮВАННЯ СОКУ ПО
КОЛЬОРОВОСТІ У ВИПАРНОМУ
ВІДДІЛЕННІ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ**

<https://doi.10.5281/zenodo.15424598>

УДК 664.1: 519.71

Фесенко А.М. Оптимізація режимів випарювання соку по кольоровості у випарному відділенні цукрового заводу

Анотація. Розглянуто проблеми неефективної роботи цукрових заводів в Україні. Увага приділена оптимізації роботи випарного відділення цукрового заводу, яке забезпечує парою всі основні виробництва заводу і визначає енергоефективність усього виробництва. Визначено проблеми у виробництві цукру, що знижують конкурентоспроможність галузі в Україні. Проведеним дослідженням визначено вплив якісних показників соку на якість цукру і недоліки в системі управління технологічним процесом випарювання, які пов'язані зі змінами в режимі роботи випарної установки. Показано, що при неврахуванні показників якості цукрової сировини знижується як якість продукції, так і ефективність всієї системи управління виробництвом. Визначено проблеми у функціонуванні системи оптимізації технологічного процесу випарювання. Враховуючи складність процесу випарювання соку у багатокорпусній випарній установці і вплив багатьох показників процесу, як технологічного, так і якісного характеру, визначено основні вектори процесу управління при оптимізації випарювання соку по якісним показникам. Розглянуто основні критерії ефективності цукрового виробництва, нормативні вимоги, теоретичні основи та практичний досвід впровадження та використання критеріїв якості у системі оптимізації в країнах, що використовують енергоефективні та конкурентоспроможні технології у цукровому виробництві. Обґрунтована ефективність запропонованих критеріїв якості продукції для математичного забезпечення роботи системи управління процесом випарювання. Зроблені висновки, що отриманий критерій ефективності по якісних показниках дає можливість використовувати запропоноване математичне забезпечення для оптимізації режимів роботи в системі управління випарюванням соку у багатокорпусній випарній установці цукрового заводу.

Ключові слова: оптимізація, математична модель, показники якості, багатокорпусна випарна установка, критерії ефективності, технологічний процес, система управління.

Fesenko A.M. Optimization of juice evaporation modes by coloration in evaporation section of sugar factory

Abstract. The problems of inefficient operation of sugar factories in Ukraine are considered. Attention is paid to optimizing the operation of the evaporation section of a sugar factory, which provides steam to all the main production units of the plant and determines the energy efficiency of the entire production. Problems in sugar production that reduce the competitiveness of the industry in Ukraine are identified. The conducted research has

determined the influence of juice quality indicators on sugar quality and shortcomings in the evaporation process control system, which are associated with changes in the operation mode of the evaporation unit. It is shown that if the quality indicators of sugar raw materials are not taken into account, both the quality of products and the efficiency of the entire production management system are reduced. Problems in the functioning of the evaporation process optimization system are identified. Taking into account the complexity of the juice evaporation process in a multi-body evaporation plant and the influence of many process indicators, both technological and qualitative, the main vectors of the management process for optimizing juice evaporation by qualitative indicators are determined. The main criteria for the efficiency of sugar production, regulatory requirements, theoretical foundations and practical experience in implementing and using quality criteria in the optimization system in countries that use energy-efficient and competitive technologies in sugar production are considered. The effectiveness of the proposed product quality criteria for mathematical support of the evaporation process control system is substantiated. It was concluded that the obtained efficiency criterion for qualitative indicators makes it possible to use the proposed mathematical software for optimizing the operating modes in the juice evaporation control system in a multi-body evaporator of a sugar factory.

Keywords: *optimization, mathematical model, quality indicators, multi-body evaporator, efficiency criteria, technological process, control system.*

Постановка проблеми

За умов стрімкого розвитку технологій, техніки та інформаційних систем конкурентоспроможність і забезпечення технологічних процесів у цукровій галузі повинні відповідати сучасним вимогам і досягненням науки. Цукрове виробництво тут відрізняється за двома складовими. Це одне з найбільш енергозатратних виробництв, а вартість енергоносіїв набуває визначального значення на нинішньому етапі. Також важливим аспектом є якість продукції, що підтримує конкурентоспроможність та прибутковість галузі. Для підвищення ефективності роботи технологічного комплексу цукрового заводу доцільно доповнювати системи управління технологічним процесом (далі – ТП) моделями, методами та алгоритмами діагностики і прогнозування, які дозволять у реальному часі оперативно виявляти, розпізнавати і прогнозувати зміни в технологічному процесі. Також важливими є знаходження, обґрунтування та реалізація коригуючих впливів у системі управління технологічними процесами, що дають можливість привести рівень роботи виробництва до конкурентоспроможного рівня, з відповідною якістю продукції [1, 2].

Високоєфективне цукрове виробництво характеризується, у першу чергу, такими показниками: якість, енергоефективність, собівартість. Досягнення цих ефективних показників забезпечується використанням найсучасніших технологій виробництва, обладнання, автоматизованих систем управління процесами, компютеризацією виробничих процесів, а також організаційними інструментами. В наш час, в умовах ринкової економіки переважають неперервні технологічні процеси великої потужності зі складними комплексами енергетичних і матеріальних потоків і жорсткими вимогами до якості продукції, безпеки персоналу, збереження обладнання та до дії на навколишнє середовище. Все це призводить до необхідності створення сучасних ефективних систем управління.

Цукровий завод складається з таких важливих відділень: дифузійне, сокоочисне, випарне та кристалізаційне. Ці відділення використовують неперервні процеси із енергетично-тепловими складовими. Основним відділенням, що впливає на

енергоефективність роботи цукрового заводу є випарне, яке приймає та розподіляє пар по інших відділеннях [3, 4].

Багатокорпусна випарна установка здійснює випарювання соку до заданої концентрації, забезпечує вторинними парами теплообмінне обладнання не тільки у випарному відділенні, а і по інших відділеннях заводу. Таким чином, однією з основних задач багатокорпусної випарної установки (далі – БВУ) є отримання на виході установки фіксованого концентрованого розчину з вмістом, необхідним для отримання якісної продукції, сухих речовин, РН, тощо. Невідповідність якісних показників отриманого розчину вимагає додаткових витрат пари на процес кристалізації у вакуум-апаратах у відділенні кристалізації [3, 4].

Таким чином, основним завданням управління ВУ є: підтримка необхідного технологічного режиму, з фіксованими значеннями технологічного процесу, стабілізація рівнів розчину в апаратах, одержання необхідного кольору розчину та забезпечення користувачів парою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На основі останніх досліджень можна виділити такі головні проблеми в роботі випарного відділення [3, 4, 5]:

- забезпечення якості сировини, що повинна відповідати розрахунковим значенням на усіх етапах виробництва;
- динамічність змін розчину при роботі БВУ викликана змінюваними в часі якісними параметрами уварюваного розчину та змінюваними показниками тепло- та масообмінних процесів;
- невідповідність реагування системи управління на зміни в технологічному процесі випарювання;
- складність інженерних розрахунків теплового процесу випарювання, що застосовуються в системі управління (застосування приблизних критеріїв та табличні значення, що використовуються при розрахунку теплових показників процесу випарювання, що постійно змінюється);
- застосування ефективного математичного забезпечення у системі управління технологічним процесом випарювання.

Для отримання конкурентоспроможної цукрової продукції в Україні необхідно вимоги до якості цукрової продукції привести у відповідність до нормативних європейських вимог та вимог, що використовуються у країнах з розвинутою цукровою галуззю [6, 7].

Низька якість сиропу після випарювання є однією з основних причин погіршення якості цукру, зокрема більш високий вміст в ньому золи і підвищена кольоровість.

Відомо, що для отримання цукру високої якості чистота сиропу повинна бути не нижче 92%. Величина чистоти сиропу залежить від якості перероблюваної буряків, параметрів процесів екстрагування цукру і очищення дифузійного соку. Помилки, допущені при добуванні сахарози і очищення соку, в подальшому практично виправити неможливо. [3, 4, 7]

Значне наростання кольоровості спостерігається при згущенні соку зниженого якості, особливо що містить значну кількість редукувальних речовин. Це має місце при переробці буряків зниженого якості і при недостатньому розкладанні редукувальних речовин в процесі вапняно-вуглекислотного очищення. У випарній установці, в присутності азотовмісних речовин, при підвищеній температурі, в результаті реакції Майяра утворюються інтенсивно забарвлені речовини – меланоїдини.

При відхиленнях, що мають місце у технологічних процесах перед випарюванням соку, буде відбуватися загоряння поверхні нагрівання випарної установки. У цьому випадку збільшується час перебування соку в апаратах установки і відповідно збільшується кількість розкладається сахарози і зростає кольоровість.

Час перебування соку і температура випарювання залежать також від конструкції і принципу роботи застосовуваних випарних апаратів і їх компонування в схемі випарної установки.

Також важливим фактором, що впливає на якість випарюваного соку, є накип, що утворюється на гріючій поверхні випарної установки (ВА). Накип значно знижує коефіцієнт теплопередачі у ВА, призводить до зниження продуктивності обладнання, збільшення часу перебування соку і наростання кольоровості. Вплив накипу зменшують за допомогою різних хімічних препаратів, що зменшують утворення накипу у ВА, що дуже важливо для підвищення якості продуктів і поліпшення якості цукру [8, 9].

Відповідно, виходячи з сутності процесу випарювання, треба відмітити необхідність контролю технологічних показників (тиск, температура, концентрація, кольоровість тощо), що постійно змінюються в залежності від змін показників розчину у процесі випарювання [9].

Тепловий розрахунок процесу випарювання полягає у визначенні площі поверхні теплообміну випарних апаратів та витрати пару і містить досить складну методику. Велика кількість показників, що враховується у розрахунку ускладнюють визначення реальних значень ТП випарювання, що, в свою чергу, призводить до зниження ефективності процесу випарювання та роботи системи управління [3, 4, 10].

Сучасна теорія управління включає в себе теорію оптимального управління, тобто оптимальні системи, при функціонуванні яких мінімізується або максимізується заданий функціонал якості. Крім того, важливим питанням, щодо визначення ефективності процесу випарювання є визначення критеріїв управління [10, 11].

Виходячи з наведеного аналізу ефективності основних напрямків у виробництві та переробці цукру можна зробити висновки, що для підвищення конкурентоспроможності галузі необхідно вирішувати цілий комплекс проблем на всіх етапах цукрового виробництва. При цьому, однією з основних складових підвищення якості, є удосконалення системи управління у випарному відділенні, яке дасть можливість привести якісні показники розчину до нормативних, і отримати нормативні значення якості цукру.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності БВУ цукрового заводу за рахунок розробки та впровадження сучасних критеріїв та математичних моделей визначення якості соку у системі управління технологічним процесом випарювання.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні задачі: аналіз та обґрунтування застосування сучасних критеріїв якості соку та оцінка різного виду збурень у процесі випарюванні щодо якості продукції для застосуванні у системі управління ТП випарного відділення.

Результати досліджень

Аналіз та обґрунтування застосування сучасних ефективних критеріїв якості соку для системи управління випарним відділенням цукрового заводу. Основними

показниками якості цукру є вміст сахарози, зола, редукувальні речовини, вологість та кольоровість [6].

Основними якісними показниками цукру, що використовуються Європейським Співтовариством і державами, які ефективно займаються виробництвом цукру, а також відповідно до ДСТУ 4623:2006, є кольоровість. Нормативні значення показників кольоровості у розчині, відповідно цих вимог, для цукру 1-ї категорії – не більше ніж 45 одиниць ICUMSA, 2-ї категорії - 60, 3 категорії – 104, а 4-ї категорії 195 од. Відповідно до наказу Мінагрополітики від 02.11.2017 № 592 «Про затвердження Вимог до видів цукрів, призначених для споживання людиною», впроваджено основні якісні показники цукру, що відповідають міжнародним вимогам, кольоровість у розчині, для категорії «екстра білий цукор» – не більше ніж 22,5 од. ICUMSA.

На цукрових заводах БВУ як і інші відділення виробництва працюють в невизначених умовах, які, в свою чергу, поділяються по невизначеності мети, невизначеності зовнішнього середовища та невизначеності особи, що приймає рішення. У більшості випадків за критерій управління БВУ беруть мінімум енергетичних витрат, тобто мінімум витрати пари. При визначенні якісних показників – мінімум середньоквадратичного відхилення концентрації сиропу на виході з ВУ. Але таке задання критерію веде до неповного врахування тих параметрів, які входять в обмеження, а отже, до недостачі вторинної пари користувачам, недоцільне перевищення витрати пари і т.д. Тому найповнішим критерієм функціонування БВУ може бути буде згортка названих. Але нестаціонарність роботи БВУ, що викликана змінними в часі параметрами уварюваного розчину та змінними показниками тепло- та масообмінних процесів випарювання, ускладнює визначення такого загального критерію і знижує ефективність визначення цього критерію.

Типові збурення, що призводять до нестаціонарності роботи, ділять на зовнішні та внутрішні. Ці збурення збільшують час випарювання, і, відповідно підвищують кольоровість.

Теоретично, визначення часу перебування розчину у БВУ здійснюється із розгляду фізичної суті процесу випарювання, який полягає у термічному концентруванні розчинів при кипінні та частковому видаленню води у вигляді пару [11].

Лінійність термічного розкладання сахарози від часу процесу дозволяє спростити задачу її визначення шляхом використання середнього часу перебування, яке визначається як відношення обсягу витрати розчину (V_p) до величини обсягу розчину, що міститься в апараті (V_a):

$$\tau = \frac{V_p}{v_a} \quad (1)$$

Збільшення часу випарювання та збільшення температури кипіння призводить до зростання втрат цукру від термічного розкладу та наростання кольоровості сиропу. Наростання цукрових речовин та втрати цукру корелюють між собою [13].

Відповідно, знаючи величину об'ємної втрати розчину із БВА і його густину можливо визначити величину середнього часу перебування розчину у кожному ВА, і відповідно і у всій БВУ. По результатах розрахунків, проведених відповідно до наведеної формули (2), отримано значення нормативного терміну перебування розчину у БВУ заводу з продуктивністю 3000 т. буряка/добу, з площами теплообміну по корпусах БВУ – 1к-2360м², 2к-3000м²; 3к-2360/1200м²; 4к-1200м²; 5к-100м², які відображено в таблиці 1. Для порівняння в табл. 1 наведено і значення фактичних режимів роботи БВУ з різного виду збуреннями, які призводять до зміни кольоровості [7, 11].

Аналіз показав, що за впливу різного виду збурень кольоровість, у середньому підвищується на 30-50%. Значення рН до та після БВУ коливалось у межах від 8,3 та 9,1, а СР від 14% до 68%. В процесі випарювання застосовувались різного виду хімічні препарати для очистки розчину. При значних порушеннях режиму роботи кольоровість після БВУ може підвищуватися до 900 од. ICUMSA [14].

Таблиця 1

Усереднені значення терміну випарювання та кольоровості у БВУ цукрових заводів

Вид режиму випарювання	БВУ на заводі з продуктивністю 6000 т/добу		
	Кольоровість сиропу до ВУ, од. ICUMSA	Термін випарювання, хв.	Кольоровість сиропу після ВУ, од. ICUMSA
Нормативний (розрахунковий)	150-250	43-57	250-300
Фактичний	200-350	82-104	300-550

Визначення та оцінка впливу різного виду збурень при випарюванні на кольоровість сиропу для застосування системі управління випарного відділення цукрового заводу. Основою системи управління є математичне забезпечення з використанням сучасних критеріїв якості, математичних моделей та відповідних інженерних розрахунків.

Тому для визначення впливу різних факторів на процес випарювання води з соку у випарній установці, необхідно розглянути рівняння матеріального балансу [4,16]:

$$G_{\Pi} = G_{\kappa} + W, \quad (2)$$

де G_{Π} – продуктивність по початковому розчину, кг/год;

G_{κ} – продуктивність по кінцевому розчину, кг/год;

W – загальна кількість випареної води, кг/год.

У розчині, який випаровується у ВУ, повинна зберігатися рівність твердої маси, яка визначається такими корелюючими показниками як концентрація розчину, кольоровість, каламутність тощо. З урахуванням кольоровості розчину рівність твердої речовини можна відобразити наступним чином [15, 16]:

$$G_{\Pi} K_{\Pi} = G_{\kappa} K_{\kappa}, \quad (3)$$

де K_{Π} та K_{κ} – початкова та кінцева кольоровість розчину, од. ICUMSA.

Скориставшись формулами (2) та (3), визначимо загальну кількість води W_s , що випаровується за бажаної кольоровості:

$$W_s = G_{\Pi} \left(1 - \frac{K_{\Pi}}{K_{\kappa}}\right). \quad (4)$$

При цьому концентрація та кольоровість розчину корелюють, і відповідно до ДСТУ 4866:2007 [17].

З рівняння (3) визначимо кольоровість продукції, яке буде мати вигляд:

$$K_{\kappa} = \frac{K_{\Pi}}{1 - \frac{W_s}{G_{\Pi}}}. \quad (5)$$

Відображення диференціалу через кольоровість дає можливість більш точно показати чутливість до різного виду збурень при випарюванні. Продиференціювавши вираз (6) по W_s/G_{Π} отримаємо чутливість кольоровості розчину до співвідношення гріючої пари і продуктивності соку [18]:

$$\frac{dK_x}{\left(\frac{W_2}{G_P}\right)} = \frac{K_x(K_x - K_P)}{K_P} \quad (6)$$

Скориставшись формулою (5), ми встановили, що кольоровість розчину підвищилася впродовж процесу випарювання на 1,1-1,5% від нормативних 250 од. ICUMSA для цукру 1-ї категорії (табл. 1). Проведений аналіз показує, що запропонований підхід з використанням показника якості є доволі ефективним, і його можна використовувати в СУ цукровому виробництві [18].

Запропонований якісний критерій ефективності процесу випарювання (розрахунок 6), введений у алгоритм руху та порядку застосування даних у тепловому розрахунку для математичного забезпечення СУ ТП БВУ (рис. 1).

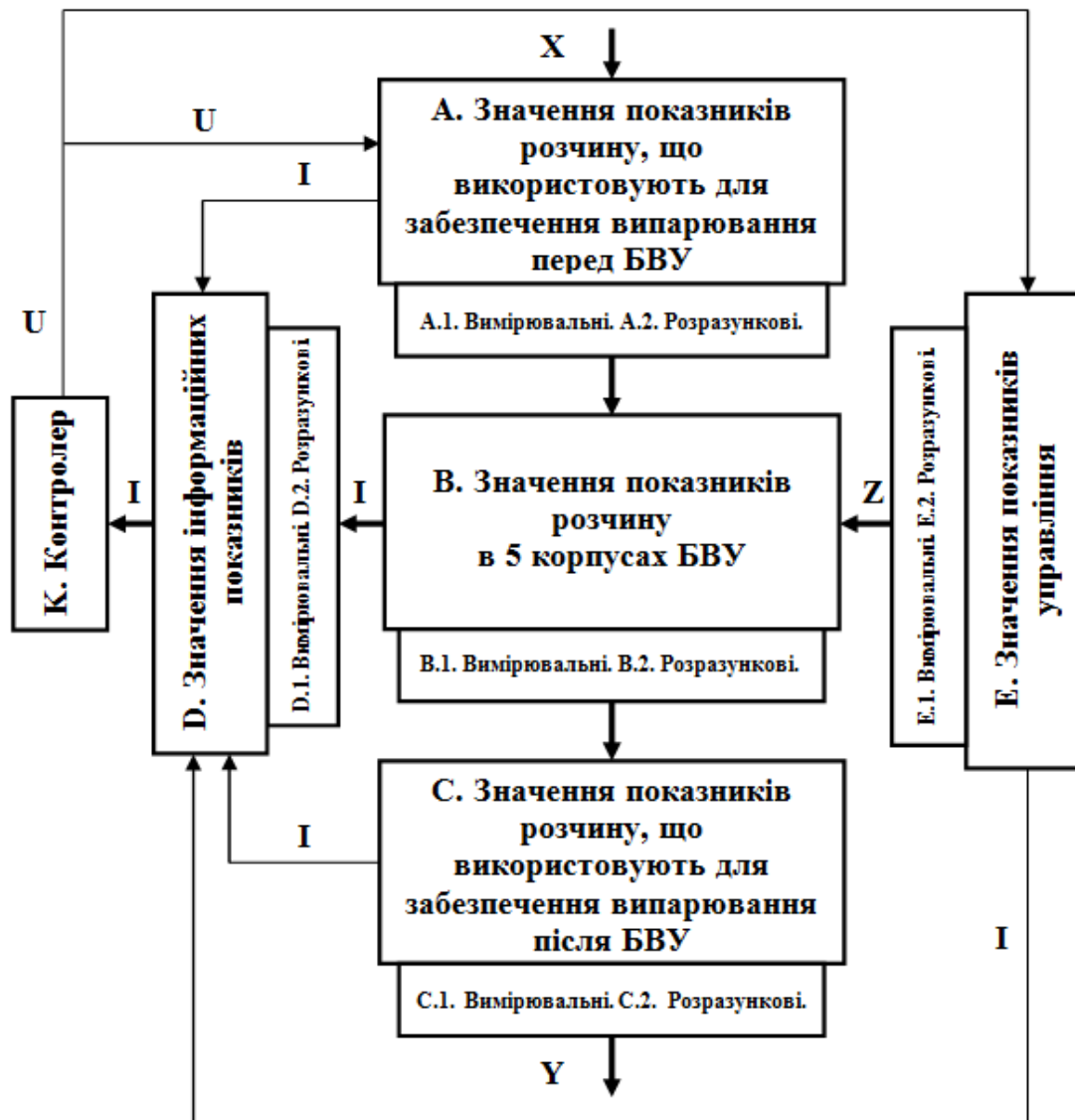


Рис. 1. Алгоритм руху та порядок застосування даних у тепловому розрахунку процесу випарювання для математичного забезпечення СУ ТП БВУ: X – вхідний вектор; Y – вихідний вектор; U – вектор керування; Z – вектор збурень; I – інформаційний вектор; А - інформаційні значення показників для СУ до БВУ; В – інформаційні значення показників з об'єкту управління для СУ; С – інформаційні значення показників для СУ після БВУ; D – обробка інформаційних показників; Е – інформаційні значення показників управління; К – контролер

Усі інформаційні показники I (вимірні та розрахункові), з відображених баз даних на рис. 1 (А, В, С, Е) надають інформацію в базу D для обробки та розрахунку теплового режиму роботи БВУ у відповідний час [18].

Висновки

Підвищення конкурентоспроможності цукрової продукції можна досягнути шляхом введення в математичне забезпечення процесу оптимізації режимів роботи випарної установки впливу збурень, які мають місце при випарюванні води з цукрового соку. Коригування виробництва цукру, а відповідно і процесу випарювання, необхідно здійснювати з використанням показника кольоровості. Кольоровість залежить від часу випарювання у БВУ та різних збурень в ТП. Ефективна система управління щодо забезпечення оптимальних режимів роботи випарної установки підвищить якісні показники цукру при врахуванні кольоровості при випарюванні соку у БВУ. Отримано залежність цього критерію від впливу таких видів збурень процесу випарювання як теплове навантаження, продуктивність розчину та якісні показники розчину. Запропоновано алгоритм руху процесу управління випарюванням та порядок застосування даних у тепловому розрахунку процесу випарювання для математичного забезпечення системи управління БВУ. Отримані результати щодо визначення впливу показників збурень на якісний показник демонструють ефективність запропонованого підходу і доцільність використання в системі математичного забезпечення управління процесом випарювання.

Список використаних джерел

1. Вимоги до виробництва цукру приведено у відповідність до європейських. Урядовий портал. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/ua/news/vimogi-do-virobnictva-cukru-privedeno-u-vidpovidnist-do-yeuropejskih>
2. Власенко Л.О. Ладанюк А.П. Підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу за рахунок використання методів діагностики та прогнозування. Східноєвропейський журнал передових технологій. 2010. № 2/3 (44). С. 57–62
3. Штангеев К. О. Випарні установки та теплові схеми цукрових заводів. Київ. 2015. 57 с.
4. Дідур В.А., Стручаєв М.І. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві. Київ. Аграрна освіта. 2008. 233 с.
5. Ensinas A.V., Nebra S.A., Lozano M.A., Serra L. Design of evaporation systems and heaters networks in sugar cane factories using a thermoeconomic optimization procedure. Int. J. of Thermodynamics. 2007. Vol. 10 (No. 3). P. 97–105.
6. ДСТУ 4623-2006. Національний стандарт України. Цукор білий. Технічні умови. Київ. 2007. 18 с.
7. Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Ляшенко О.С., Кісь В.М. Обґрунтування застосування показників якості в енерго- та екологічно ефективних АСУ цукрового виробництва. Інженерія природокористування: науковий журнал. 2019. №4 (14). С. 47–56.
8. Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Ляшенко О.С. Определение параметров производственных опасных факторов для моделирования процесса выпаривания в сахарном производстве. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2017. Вип. 180. С. 182–190.

9. Процеси та апарати хімічних виробництв. Distance Learning. СумДУ. Режим доступу: <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266104/index.html>.
10. Ковриго Ю.М., Степанець О.В., Баган Т.Г., Бунке О.С. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління: підручник. Київ. КПІ імені Ігоря Сікорського. 2017. 155 с. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriia-upravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf.
11. Штангеев К.О. Час перебування розчину у випарній установці. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку цукрової промисловості України». Київ. НУХТ. 2019. С. 98–101. Режим доступу: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30325/1/evaporation%20plant.pdf>.
12. Опорний конспект лекцій з дисципліни «Теорія прийняття рішень». Режим доступу: <http://dspace.tneu.edu.ua/retrieve/52501/lek.pdf>
13. Галацан Л.А. Робота цукрових заводів України при переробці цукрових буряків урожаю 2018 року. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції цукровиків України «Перспективи розвитку цукрової промисловості України». Київ. НУХТ. 2019. С. 18–30.
14. Рева Л.П., Виговський В.Ю. Підвищення якості та виходу цукру шляхом адсорбційного очищення сиропу в сучасній технологічній схемі. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції цукровиків України «Перспективи розвитку цукрової промисловості України». Київ. НУХТ. 2019. С. 89–96.
15. Ladanyuk A., Kyshenko V., Shkolna O. Evaporator control under conditions of uncertainty: intellectualization of applied functions. Scientific works of The National University of Food Technologies. 2015. Vol. 21. Issue 6. P. 7–15.
16. Ляшенко С.А., Фесенко А.М., Ляшенко А.С. Выбор автоматизированных режимов работы выпарной установки сахарного завода. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2010. Вип. 106. С. 217–231.
17. Методи визначення кольоровості і каламутності розчину. ДСТУ 4866:2007. Київ: Держспоживстандарт України. 2007. 12 с.
18. Liashenko S., Fesenko A., Liashenko O., Kis V., Ivashchenko H. Determination and estimation of the influence of different types of disturbances on the thick juice colour to apply in automated process control systems of the sugar mill evaporators. International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER). 2020. Vol. 8. Issue 5. P. 2133–2139. <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter107852020.pdf>

References

1. The requirements for sugar production have been brought into line with European ones. Government portal. Access mode: <https://www.kmu.gov.ua/ua/news/vimogi-do-virobnictva-cukru-privedeno-u-vidpovidnist-do-yevropejskih>
2. Vlasenko L.O., Ladanyuk A.P. (2010). Increasing the efficiency of the functioning of the technological complex of a sugar factory through the use of diagnostic and forecasting methods. Eastern European Journal of Advanced Technologies. № 2/3 (44). P. 57–62
3. Shtangeev K.O. (2015). Evaporation plants and thermal schemes of sugar factories. Kyiv. 57 p.
4. Didur V.A., Struchayev M.I. (2008). Heat engineering, heat supply and heat use in agriculture. Kyiv. Agrarian education. 233 p.

5. Ensinas A.V., Nebra S.A., Lozano M.A., Serra L. (2007). Design of evaporation systems and heaters networks in sugar cane factories using a thermoeconomic optimization procedure. *Int. J. of Thermodynamics*. Vol. 10 (No. 3). P. 97–105.
6. DSTU 4623-2006. (2007). National standard of Ukraine. White sugar. Technical conditions. Kyiv. 18 p.
7. Lyashenko S.O., Fesenko A.M., Lyashenko O.S., Kis V.M. (2019). Justification of the use of quality indicators in energy and environmentally efficient ACS of sugar production. *Environmental Engineering: Scientific Journal*. №4 (14). P. 47–56.
8. Lyashenko S.O., Fesenko A.M., Lyashenko O.S. (2017). Determination of parameters of production hazardous factors for modeling the evaporation process in sugar production. *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*. Kharkiv. Vol. 180. P. 182–190.
9. Chemical production processes and devices. Distance Learning. Sumy State University. Access mode: <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266104/index.html>.
10. Kovrygo Yu.M., Stepanets O.V., Bagan T.G., Bunke O.S. (2017). Modern management theory. Part 2. Applied aspects of modern management theory: textbook. Kyiv. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 155 p. Access mode: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriia-upravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf.
11. Shtangeev K.O. (2019). The residence time of the solution in the evaporation unit. Proceedings of the international scientific and technical conference “Prospects for the development of the sugar industry of Ukraine”. Kyiv. NUHT. P. 98–101. Access mode: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30325/1/evaporation%20plant.pdf>
12. Reference lecture notes on the discipline "Decision Making Theory". Access mode: <http://dspace.tneu.edu.ua/retrieve/52501/lek.pdf>
13. Galatsan L.A. (2016). Work of Ukrainian sugar factories in processing sugar beets of the 2018 harvest. Materials of the International Scientific and Technical Conference of Ukrainian Sugar Producers “Prospects for the Development of the Sugar Industry of Ukraine”. Kyiv. NUHT. P. 18–30.
14. Reva L.P., Vyhovsky V.Yu. (2019). Improving the quality and yield of sugar by adsorption purification of syrup in a modern technological scheme. Materials of the International Scientific and Technical Conference of Sugar Producers of Ukraine "Prospects for the Development of the Sugar Industry of Ukraine". Kyiv. NUHT. P. 89–96.
15. Ladanyuk A., Kyshenko V., Shkolna O. (2015). Evaporator control under conditions of uncertainty: intellectualization of applied functions. *Scientific works of The National University of Food Technologies*. Vol. 21. Issue 6. P. 7–15.
16. Lyashenko S.A., Fesenko A.M., Lyashenko A.S. (2010). Choice of automated operating modes of the evaporation unit of a sugar factory. *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*. Kharkiv. Vol. 106. P. 217–231.
17. DSTU 4866:2007. (2007). Methods for determining the color and turbidity of a solution. Kyiv. State Consumer Standard of Ukraine. 12 p.
18. Liashenko S., Fesenko A., Liashenko O., Kis V., Ivashchenko H. (2020). Determination and estimation of the influence of different types of disturbances on the thick juice colour to apply in automated process control systems of the sugar mill evaporators. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)*. Vol. 8. Issue 5. P. 2133–2139. <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter107852020.pdf>