



УДК 519.71:[681.5:664.1]

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ СОКУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Ляшенко С. О.¹, д.т.н.<http://orcid.org/0000-0001-8304-9309>Кісь В. М.¹, к.т.н.<http://orcid.org/0000-0002-7014-4873>Фесенко А. М.¹,<http://orcid.org/0000-0002-3950-3604>Ляшенко О. С.², к.т.н.<http://orcid.org/0000-0002-0146-3934>

¹ Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

² Харківський національний університет радіоелектроніки

E-mail: lyashenkosa05@ukr.net, тел.: 067-91-451-43

Анотація - розглянуто проблеми неефективної роботи цукрових заводів в Україні, а також, відповідно, і вплив роботи випарного відділення цукрового заводу, що забезпечує парою всі основні виробництва заводу, на енергоефективність буряко-цукрового виробництва. Проведеними дослідженнями визначено вплив технологічних та технічних параметрів роботи багатокорпусних випарних установок, що працюють по різних схемах випарювання, на роботу всього цукрового заводу. Розглянуто енергоефективність процесу випарювання у різних типах випарювальних установок та встановлено перспективні підходи до вирішення проблеми енергоспоживання та енергорозподілу.

Визначено характерні конструктивні та технологічні особливості технологічного обладнання багатокорпусних випарних установок, що використовуються при різних схемах процесу випарювання соку. Зроблено аналіз впливу якісних показників технологічного процесу випарювання на якість продукції, що випускається. Показано шляхи вирішення проблем, що виникають при зниженні якості продукції і ефективності виробництва цукру, коли не враховуються показники якості сировини, що переробляється, впродовж виконання технологічного процесу випарювання.

Визначено проблеми в роботі автоматизованих систем управління технологічним процесом випарювання. У зв'язку зі складністю процесу випарювання соку у багатокорпусній випарній установці і впливом різних показників процесу як технологічного, так і якісного характеру визначено основні вектори процесу управління в автоматизованих системах управління технологічним процесом випарювання соку. Для вирішення цієї проблеми розглянуто ефективні підходи щодо використання і побудови простих регресійних математичних моделей, які можна впроваджувати в математичне забезпечення конкретних автоматизованих систем управління. Побудовані математичні моделі роботи багатокорпусної випарної установки, що враховують як показники технологічного характеру, так і показники якості продукції, що



використовуються в автоматизованих системах управління технологічними процесами цукрового заводу. Обґрунтована ефективність запропонованих моделей для роботи в системі автоматизованого управління процесом виварювання. Відповідно, є підстава стверджувати, що отримані регресійні математичні моделі, де враховано як показники технологічного характеру, так і показники якості соку у першому наближенні можна використовувати у системі автоматизованого управління випарювання соку.

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

Постановка проблеми. Важливою задачею цукрового виробництва в Україні є забезпечення населення цукром. Цукрове виробництво є складним комплексом, що відноситься до основних продуктивних галузей аграрної промисловості держави. Цукрове виробництво у переробній галузі сільськогосподарського напрямку є одним з найбільш складних та енергозатратних.

Сучасне високоефективне цукрове виробництво характеризується такими показниками як якість продукції, енергоефективність, собівартість. Підвищення ефективності цих показників забезпечується використанням найсучасніших технологій виробництва, обладнання, автоматизованих систем управління процесами та обладнанням, а також організацією цукрового виробництва [1, 2].

Найбільш енергозатратним етапом цукровиробництва є випарювання цукрового соку у випарній установці. Враховуючи складність і слабку енергоефективність цього процесу, актуальним завданням є втілення додаткових показників технологічного процесу (ТП), що носять якісний характер, в систему автоматизованого управління випарного відділення. Підвищення ефективності управління процесом випарювання здійснюється шляхом впровадження простих регресійних моделей у математичне забезпечення АСУТП, що враховують і якісні показники соку, який переробляється у випарній установці (ВУ) цукрового заводу.

Аналіз останніх досліджень. Сучасний цукровий завод є високоефективним та складним об'єктом, що має багато виробничих етапів. Залежно від якості сировини у ході переробки продукції оператори часто бувають вимушені змінювати технологічну схему переробки продукції відповідно до змін показників якості та кількості продукції за допомогою АСУТП [3].

Всі технологічні процеси отримання цукру на заводі супроводжуються значним споживанням теплової енергії. Основним відділенням цукрового заводу, що приймає свіжу пару від ТЕЦ і забезпечує всі підрозділи заводу парою на технологічні потреби, є



випарне, з основним його обладнанням – випарною установкою. Тому для цукрових заводів України стратегічний напрямком економії – зменшення споживання свіжої пари у технологічному процесі випарювання [2, 3].

На цукрових заводах України теплові схеми найчастіше базуються на використанні п'ятикорпусних випарних установок. За ритмічної роботи заводу з переробки буряків нормальної якості, підвищення температури кипіння соку не дає видимого негативного впливу на технологічні показники: наростання кольоровості та розкладання цукру. Найчастіше у цукровій промисловості України використовують випарні апарати (ВА) з природною циркуляцією, що мають досить високі технічні та технологічні показники. Найбільша ефективність роботи забезпечується за певного оптимального рівня соку, що регулюється автоматично і залежить перш за все від концентрації соку [2, 3].

До недоліків таких апаратів можна віднести обмеження по висоті теплообмінних труб і діаметру корпусу. Крім того, для економії паливно-енергетичних ресурсів, підвищують концентрацію сиропу до рівня 70...75 % вмісту сухих речовин (СР). Але при цьому теплотехнічні характеристики ВА погіршуються. Іншим недоліком ВА з природною циркуляцією є відносно значний питомий об'єм соку, це збільшує тривалість його перебування в апараті під дією високих температур. Як наслідок, погіршення якості сиропу, а отже, підвищення кольоровості та вмісту редукувальних речовин у готовій продукції [4].

Одними з показників, що визначають якість випарюваного соку і дають можливість контролювати хід процесу випарювання, є каламутність, лужність та рН соку [1, 5]. Результати досліджень показують, що сік має показник каламутності вищий у 20-38 разів для соку I сатурації, у 19-41 рази для соку II сатурації [6]. За відсутності контрольного фільтрування соку I сатурації осад, що залишився, пептизується і всі нецукри переходять у сік. Крім того, у сокові, що знаходиться впродовж довгого часу в умовах підвищеної лужності і температури, збільшується кольоровість [7].

У процесі виробництва різні органічні та неорганічні речовини, які є у соці або утворюються при згущенні та уварюванні сиропу, впливають на якість продукції. Їх концентрація обумовлює кольоровість продукту і залежить від параметрів проведення цих процесів. Таким чином, для отримання готової продукції високої якості необхідно проводити оперативний контроль не тільки



кольоровості готової продукції, але й ретельний контроль кольоровості продуктів виробництва [1, 2, 6, 8].

Наростання вмісту забарвлених речовин залежить від рН середовища, температури, тривалості і гідродинаміки процесу, питомої поверхні випарної установки, конструктивних особливостей апаратів [8].

Закордонні фахівці у галузі цукрового виробництва вважають, що існує чітка кореляційна залежність між показниками «кольоровість» та «каламутність» цукру. Зробивши порівняльну оцінку критеріїв якості, які використовують на підприємствах по виробництву напоїв, і ДСТУ 4623:2006, можна відмітити, що кореляційна залежність існує [8, 9].

Під час випаровування різні складові частини соку, що є супутниками сахарози, реагуючи з вапном, змінюються в цукрових розчинах під впливом концентрації та температури і випадають в осад. Відкладення осадів на поверхні нагріву, яке зазвичай називають накипом, залежить від способу отримання і очищення соку, від властивостей буряку та інших допоміжних матеріалів. Крім того, осади на поверхні нагріву зменшують коефіцієнт теплопередачі у ВУ, що призводить до зниження її продуктивності [6, 9].

Проаналізувавши різноманітні конструктивні особливості ВУ та режими роботи випарного відділення, можна відмітити, що на роботу ВУ значний вплив здійснюють: накип у кипятильних трубках ВУ, якість соку, температура соку та пари, а також інші показники [3, 9].

Отже, постійна продуктивність ВУ за кількістю випареної води може підтримуватися лише протягом деякого часу. Її подальша робота призводить до зменшення концентрації сухих речовин у сиропі і значного збільшення витрати тепла на технологічні потреби виробництва.

Для видалення накипу застосовуються найрізноманітніші способи - хімічні, механічні, гідродинамічні і т.д. Протягом десятиліть найбільш поширеним способом було хімічне очищення. Очищення поверхонь нагріву ВА від накипу відносять до трудомістких робіт. Але більш актуальними у наш час є способи попередження накипоутворення у випарній установці без зупинки її роботи. З цієї метою і за кордоном, і в Україні використовують реагенти, так звані антинакипини, що додають у сік, який подається на ВУ [3, 9].

Аналіз типових режимів роботи ВУ на цукрових заводах в Україні свідчить, що основні показники роботи (температура, тиск та витрати пари, температура кипіння соку, питомі поверхні теплообміну



тощо) змінюються, і це є підставою для коригування режимів роботи ВУ і застосування сучасних АСУТП [1, 3].

Основними причинами зниження виробничих характеристик ВУ є низька енергоефективність виробництва, недотримання технологічного процесу і низький рівень автоматизації виробничих процесів, що, в свою чергу, призводить до зменшення виходу якісного цукру [3].

Основними напрямками забезпечення енергоефективності є:

- удосконалення теплової схеми заводу;
- забезпечення високого рівня використання вторинних енергоресурсів;
- комплексна автоматизація технологічних і теплотехнічних процесів на всіх ділянках цукрового виробництва на базі мікропроцесорної техніки та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Отже, доцільним напрямком оптимізації енергоефективності цукрового заводу і зокрема ВУ є використання сучасних засобів автоматизації та програмного забезпечення в АСУТП.

На більшості заводів функціонують складні ієрархічні системи автоматизації цукрового виробництва, які базуються на структурах 3 – 4 рівнів створення АСУТП: як правило, нижчому, середньому, верхньому і додатковому, корпоративному. Вони містять різні типи контролерів, зв'язок з якими здійснюється різноманітними мережами передачі даних [10–12]. Ця концепція комплексної автоматизації базується на впровадженні ефективного сучасного програмного та математичного забезпечення і технічно та технологічно обумовлена особливостями управління цукровим виробництвом контролерами, об'єднаними з серверами мережами Ethernet [12].

Ефективна робота ВУ неможлива без автоматизованого контролю та регулювання її технологічних параметрів. Зокрема, автоматизація ВУ має забезпечити: підтримання оптимальних рівнів у корпусах ВУ, контроль теплотехнічних, якісних та технологічних параметрів, надійність [10–13].

Так, у роботі [12] запропоновано оптимізувати технологічний процес ВУ цукрового заводу шляхом впровадження математичних моделей для автоматизованих систем управління на основі методу Тагучі. При цьому забезпечується скорочення енергоспоживання за умов врахування як вхідних параметрів витрати соку та заданої температури нагрівання. Але модель не була випробувана у виробничих умовах та не враховані особливості складу сировини, що переробляється.

У роботі [13] наведені результати розробки математичної моделі



випарної установки, що дозволяє оптимізувати процес отримання цукру шляхом удосконалення розподілення фіксованої сумарної поверхні між теплообмінниками за умови максимальних обсягів соку та мінімальної кількості необхідної пари. Але невирішеним залишається питання коригування подачі пари та часу випарювання за умови зміни якості буряку, що надходить на переробку. Дослідження є доповненням аналізу [14], що фокусується на взаємодії теплообмінників і ВА, не заглиблюючись у технологічні аспекти процесу виробництва цукру.

Крім того недоліками розглянутих АСУТП є принципові проблемні елементи Ethernet (негарантована доставка деяких інформаційних потоків по магістралі до АРМ і сервера у реальному часі, зниження швидкості обміну інформації за умови зміни ТП чи збільшення виробничих потужностей і т.д.) [15, 16].

Практично усі існуючі АСУТП цукрового виробництва не відповідають у повній мірі сучасним викликам. Зокрема, вони направлені на автоматизацію окремих відділень на основі ПД-регуляторів, що не може враховувати постійні зміни режимів роботи виробництва, невідповідність потужностей різних типів обладнання та параметрів сировини тощо.

Тому доцільним є забезпечення енергоефективної роботи ВУ на основі впровадження в АСУТП при математичному моделюванні процесу додаткових параметрів, які визначають більш глибоко якість соку, що надходить на випарювання. Отже, виникає необхідність зміни концепції створення АСУТП цукрового виробництва за рахунок впровадження системного підходу, щодо універсалізації та інтелектуалізації методів і засобів [12, 15, 16].

Ціль і задачі дослідження. Метою роботи є побудова математичних моделей процесу випарювання у випарній установці для налаштування АСУТП цукрового заводу, які б враховували і якісні показники соку і забезпечували підвищення ефективності цього процесу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначити основні показники, що впливають на роботу ВУ;
- побудувати регресійні математичні моделі роботи ВУ, де б застосовувались технологічні показники процесу випарювання, і модель, де б враховувались і показники якості у технологічному процесі;
- обґрунтувати ефективність запропонованих моделей роботи ВУ.



Основна частина. Матеріали та методи побудови математичних моделей для процесу випарювання у ВУ цукрового заводу для АСУТП. Ефективність математичного моделювання процесів для АСУТП може оцінюватися певними частковими критеріями, у тому числі: точністю результатів моделювання; адекватністю, економічністю, універсальністю моделі і т.д. Основними етапами моделювання є: побудова концептуальної моделі об'єкта та її формалізація; алгоритмізація моделі об'єкта та її машинна реалізація; одержання та інтерпретація результатів моделювання. Під формалізацією у математичному моделюванні розуміють процес створення опису об'єкта мовою математики. Такий опис має врешті-решт давати змогу визначати кількісні оцінки властивостей об'єкта.

У ході процесу випарювання соку контролювались показники якості цукру, відповідно до вимог ДСТУ 4623:2006. Кольоровість визначалась згідно з ДСТУ 4866:2007/ГОСТ 12572-2007.

Ще одним важливим показником, що може знижувати якість як цукрових сиропів, так і готової продукції, є каламутність. Методика визначення каламутності та її нормативні значення повинні визначатися відповідно до Правил усталеної практики ПУП 15.83-37-106:2007 «Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру із цукрових буряків» [4].

Визначення системи впливу показників роботи ВУ на технологічний процес випарювання. ВУ як об'єкт автоматизованого управління характеризується рядом векторів, які загалом визначаються як вхідні, вихідні, збурення та інформаційні.

Визначальним фактором вихідного вектора, який впливає на якісні показники цукру, є якість сиропу, що виходить з ВУ, і характеризується такими показниками як каламутність, кольоровість, зольність та інші. Щоб отримати цукор доброї якості (дБ), чистота сиропу при виході з ВУ повинна бути близькою до 92% [2, 3, 5].

Для того, щоб оцінити вплив цих векторів при моделюванні процесу випарювання на об'єкт автоматизованого управління (ВУ), необхідно визначити повний склад найбільш важливих показників ТП. З цією метою побудуємо загальну структурну схему взаємодії векторів, що визначають функціонування ВУ як об'єкта для системи автоматизованого управління. На основі проведеного аналізу впливу різних показників ТП на ефективність виробництва було запропоновано структурну схему показників (рис. 1), що визначають функціонування ВУ як об'єкта для АСУТП.

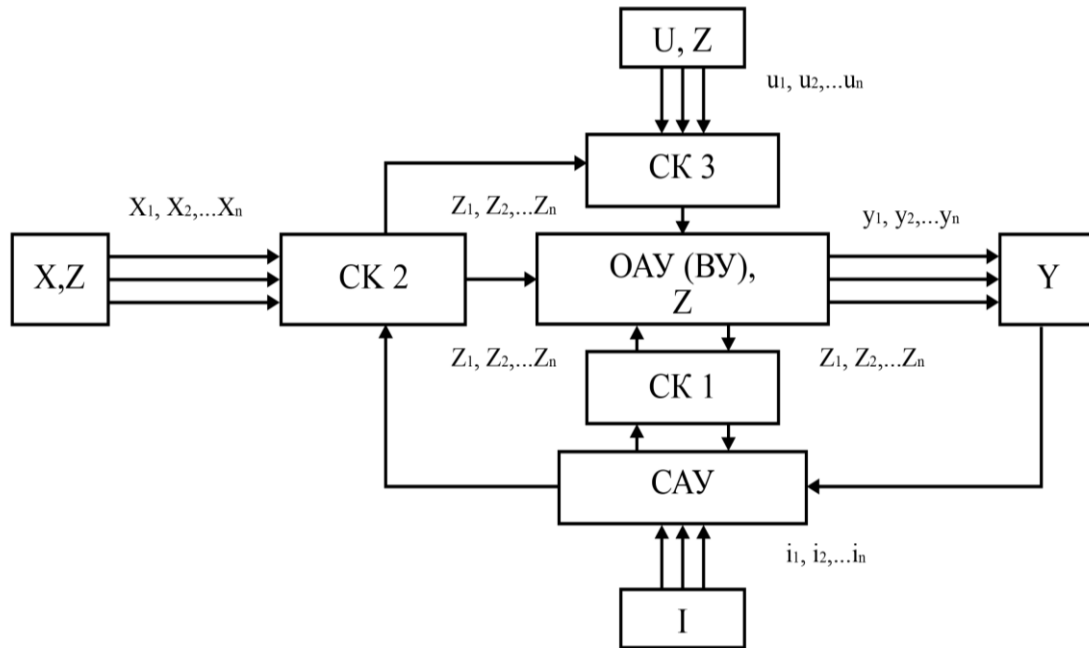


Рис. 1. Загальна структурна схема факторів, що визначають функціонування ВУ як об'єкта для автоматизованого управління: X – вхідний вектор; Y – вихідний вектор; U – вектор керування; Z – вектор збурень; I – інформаційний вектор; ОАУ – об'єкт автоматизованого управління ВУ; САУ – система автоматизованого управління ВУ; СК 1-3 – система керування (контролери) ВУ

Вхідний вектор (X) утворює наступні показники потоку соку, що подається на ВУ (x_1, x_2, \dots, x_n): витрата фільтрованого соку 2-ї сатурації (G_c), вміст сухих речовин (СР), доброякісність очищеного соку (дБ), концентрація соку (С), рН, температура (Т) і т.д. Вихідний вектор (Y) складається з таких показників (y_1, y_2, \dots, y_n) як витрата сиропу після ВУ, кольоровість та мутність сиропу, рН, час процесу випарювання. Вектор керування (U) з показниками (u_1, u_2, \dots, u_n), складається з витрати гріючої пари, тиску та температури пари, що подається на ВУ. Вектор збурень (Z) включає такі змінні як температура та теплоємність гріючої пари, тиск гріючої пари, розрідження на конденсаторній установці, а також деякі показники вхідного вектора (вміст сухих речовин, доброякісність соку, рН, температура). До показників збурень можна віднести і накип у кипятильних трубах ВУ. Інформаційний вектор (I) надає значення факторів груп X, Y, U, Z в АСУТП та порівнює зі значеннями оптимізованих параметрів ВУ і, як результат, система автоматизованого контролю здійснює керувальний вплив на режими роботи ВУ. До проміжних інформаційних показників керування відносяться рівні в корпусах ВУ,

температура кипіння по корпусах, рівні в збірниках соку, аміачної води, конденсату, сиропу, концентрації соку, рН тощо.

Побудова регресійних лінійних моделей роботи ВУ. Процес випарювання – динамічний процес, що вимагає при побудові математичної моделі визначення показників процесу та взаємозв'язку між ними. Ці дані необхідні для створення ефективного математичного забезпечення в системі управління процесом випарювання. На рис. 2 наведена типова схема АСУТП для випарювання соку, яка дає можливість здійснювати управління та регулювання ТП.

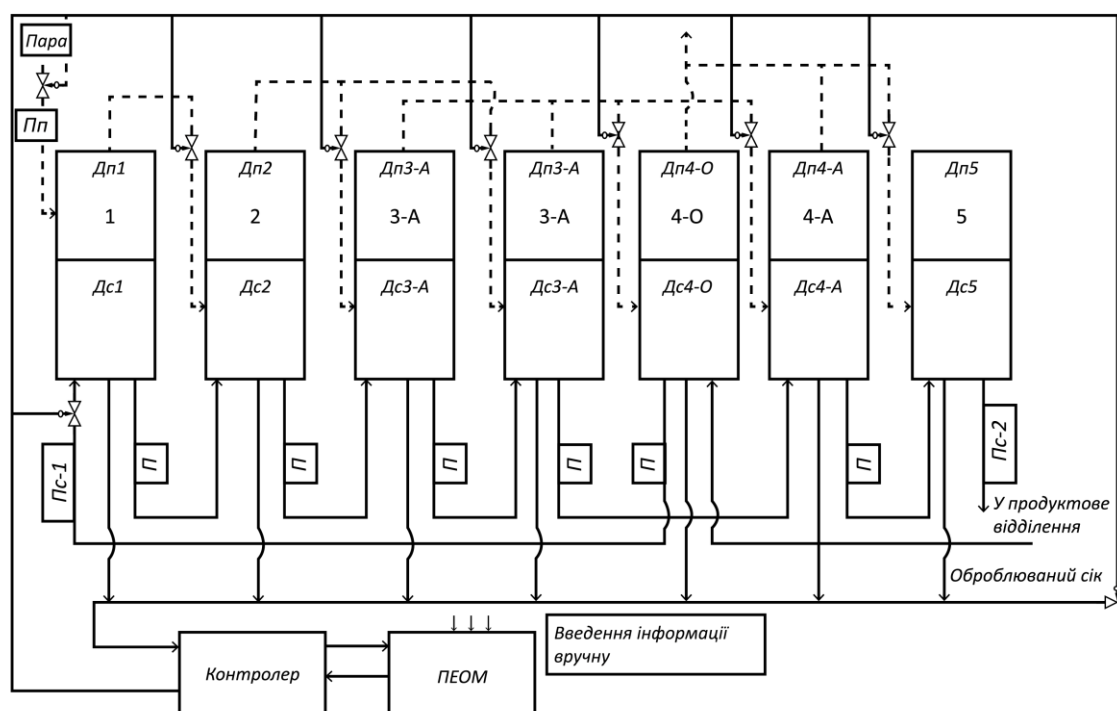


Рис. 2. Автоматизована типова схема управління технологічним процесом у випарному відділенні: 1-5 – корпуси ВУ; Дс1-Дс5 – дані соку у корпусах ВА; Дп1-Дп5 – дані пару у корпусах ВА; Пп – показники пару, що подається на ВА; Пс1 – показники соку, що подається на ВА; Пс2 – показники сиропу, що виходить з ВУ; П – показники соку, що випарюється, після ВА

У ПЕОМ вводяться дані лабораторних аналізів продукції. Введення даних і результатів лабораторних аналізів та розрахункових даних у ПЕОМ, а також характеристик теплових режимів роботи ВУ дає можливість здійснювати управління ТП випарювання.

У процесі досліджень було розглянуто два варіанти роботи АСУТП.

Варіант 1. Використовувались лише технологічні показники

процесу випарювання. Підігрівання соку, що подається на ВУ, здійснювалося відповідно до типової схеми роботи – через підігрівачі на перший корпус ВУ.

Варіант 2. Використовувались технологічні та якісні показники процесу випарювання. Підігрівання соку, що подається на ВУ, здійснювалося відповідно до удосконаленої типової схеми роботи – через четвертий корпус ВУ.

Варіант 1. При побудові регресійної моделі роботи БВУ як вихідний параметр був розглянутий Y – вихід сиропу з ВУ, а вхідними параметрами були: X_1 – витрата соку на вході у ВУ; X_2^{1-5} – витрати пари у ВУ; X_3 – температура соку на вході у ВУ; X_4^{1-5} – температура пари по корпусам ВУ; X_5^{1-5} – рівень розчину у корпусах ВУ.

Крім цього, інформаційними параметрами ВУ є температура у гріючій камері 1-го корпусу, рівень у збірнику сиропу, тиск у надсоковому просторі 1-5-го корпусів ВУ і т. д.

Основні дані оптимальних технологічних змінних режимів роботи для ВУ і результати їх обробки наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Дані оптимальних технологічних змінних режимів роботи випарної установки

Рівні оптимального режиму роботи	Витрата соку на ВУ, X_2 (% до м.б.)	Витрата пари на ВУ, X_2 (кг/год)	Температура соку на вході у ВУ, X_3 (°C)	Температура пари по корпусам, X_4 (°C)	Рівень соку у ВУ, X_5 (м/до висоти трубок, %)	Вихід сиропу з ВУ, U (% до м.б.)
		1 – 5 корпуси		1 – 5 корпуси	1 – 5 корпуси	
Верхній	132,8	31021 – 1583	130	136,3 – 96	2,01 – 1,41	35
Нижній	0	200	90	129,1 – 84	1,91 – 1,31	25
Статистичні параметри розподілу						
D_x^2	174,6	2154,3 – 638,4	24,3	24,8 – 75,4	2,46 – 4,3	11,6
m_x	74,6	162406 – 728	95,6	132,4 – 89,5	1,95 – 1,34	27,5
Med_x	70,4	15730 – 704	85,4	146,4 – 95,4	1,98 – 1,28	28,2
A_x	-1,2	0,5 – 0,6	1,1	-0,7 – (-0,5)	-0,2 – (-0,3)	0,7
E_x	4,8	6,5 – 4,3	3,9	3,2 – 5,0	2,1 – 4,3	2,6

При побудові моделей ТП випарювання для цукрового виробництва використовувались прості регресійні моделі, що описуються рівнянням

$$Y_j = \sum_{i=1}^k a_i \cdot X_i + b_j; \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

де Y_j – залежні змінні, $j = \overline{1, m}$, при цьому $m < k$;

X_i – незалежні змінні;

a_i – коефіцієнти, що відповідають незалежній змінній X_i ;

i – кількість незалежних змінних;

b_j – постійні.

Для знаходження параметрів a_i і b_j рівняння регресії (1) використовувався МНК [17–20].

Застосування МНК дало можливість отримати наступну регресійну модель для першого варіанту роботи у БВУ

$$Y = 23,7 + 3,86X_1 + 7,21X_2 - 0,95X_3 + 5,28X_4 + 12,7X_5. \quad (2)$$

Варіант 2. По аналогії з вищенаведеним визначенням регресійної математичної моделі роботи БВУ вихідним параметром теж було розглянуто Y – вихід сиропу з ВУ, а вхідними параметрами були: X_1 – витрата соку на вході у ВУ; X_2 – температура соку перед ВУ; X_3 – СР на вході у ВУ; X_4 – рН на вході у ВУ; X_5 – рівень розчину у корпусах ВУ; X_6 – температура пари на ВУ, X_7 – час випарювання.

Крім цього застосовувались і аналогічні інформаційні параметри роботи ВУ для вводу у ПЕОМ. Дані оптимальних якісно-технологічних змінних режимів роботи випарної установки наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Дані оптимальних якісно-технологічних змінних режимів роботи випарної установки

Рівні оптимального режиму роботи	Витрата соку до ВУ, Q , % до м.б., X_1 .	Температура соку та сиропу, °С, X_2 .	Сухі речовини, %, X_3	рН, X_4	Каламутність соку, фіз. од. мг/м ³ , X_5	Температура пари на ВУ, °С, X_6	Час, год., X_7	Витрата соку після ВУ, Q % до м.б., Y
Нижній	120	125	13,5	10,7	27	125	0,8	28
Верхній	122	127	14,5	10,9	29	127	1,0	30

Визначення структури моделі для опису залежності витрати соку після ВУ від вхідних факторів процесу випарювання здійснювалось методом покрокової регресії.

Після застосування МНК була отримана наступна модель:

$$Y = 53,2 + 12,34X_1 + 6,42X_2 + 13,23X_3 + 18,35X_4 - 2,7X_5 + 15,3X_6 + 4,2X_7. \quad (3)$$

Для визначення ефективності отриманої моделі (критерія оптимізації) необхідно перевірити її експериментальні результати на адекватність за допомогою критерію Фішера.

Обґрунтування ефективності запропонованих моделей роботи ВУ. У різних елементах ВУ відбуваються принципово різні за своєю природою технологічні процеси. Основними вимогами, висунутими для отриманих форм математичних моделей, є вимоги можливості реалізації цих моделей та адекватний опис розрахунковою моделлю функціонального поведіння елемента системи в умовах реальної експлуатації [18, 19].

За результатами експериментальних даних, що були отримані в системі АСУТП цукрових заводів, розраховано накопичені частоти $P_0(x)$, очікувані накопичені частоти для нормального розподілу, потім вибиралося максимальне значення $|P_0(x) - S(x)|$, за допомогою якого і визначався критерій узгодження Колмогорова – Смірнова D . Отримане значення порівнювалося з критичним. Результати наведеного порівняння дозволили зробити висновки, що з імовірністю 95 % можна прийняти гіпотезу про нормальний розподіл основних змінних підсистем, що розглядаються.

Для основних змінних досліджуваних технологічних процесів визначалися наступні статистичні характеристики: математичне очікування m_x , дисперсія D_x , медіана Med_x , коефіцієнт асиметрії, коефіцієнт ексцесу [15]. Медіана Med_x розраховується як стала оцінка центра експериментальних даних з викидами, що мінімально на неї впливають.

У цілому ж критерії, розроблені для вибору структури, зручно розділити на дві групи: критерії, що використовують екзаменаційну вибірку, та критерії, що не використовують екзаменаційну вибірку.

До критеріїв першої групи відносяться і критерії типу ковзаючого контролю (cross-validation) [20–23].

Під час розрахунку критеріїв, що відносяться до другої групи, використовується залишкова сума квадратів помилок моделі



$$RSS = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [y(i) - \hat{y}(i)]^2, \quad (4)$$

де $y(i)$, $\hat{y}(i)$ - вимірювання і оцінки.

Цей показник не може бути критерієм для вибору структури, оскільки із збільшенням складності моделі S відбувається все більш точне наближення, що можливо і допустимо лише за відсутності перешкод. Якщо відомо, що шум має нормальний розподіл, то використовують скоригований RSS

$$\frac{RSS}{K - S} \quad (5)$$

або ж статистика Фішера

$$F(S) = \frac{K}{K - S} \frac{RSS(S)}{\|y - \hat{y}\|^2}. \quad (6)$$

МНК є одним з найбільш використовуваних методів для розробки математичних моделей за результатами пасивних спостережень за роботою об'єкта. Вибір змінних для введення у регресійне рівняння здійснюється на основі статистичних критеріїв адекватності Фішера (F) і Ст'юдента (t -критерій).

Критерій Фішера визначає, чи є отримані математичні моделі адекватними експериментальним даним, тобто чи взаємозв'язок між залежною вихідною величиною досліджуваного об'єкта і незалежними змінними є випадковим, чи ні. Перевірка гіпотез про адекватність моделей (стаціонарності процесу) за критерієм Фішера визначається з виразів:

$$F_{розр} = \frac{\sigma_S^2}{\sigma_Y^2}, \quad (7)$$

$$\text{де } \sigma_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - Y_j)}{i};$$

$$\sigma_S^2 = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{ij});$$

$$Y_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{n};$$

i – кількість серій досліджень, $i = \overline{1, n}$;

j – кількість досліджень у кожній серії, $j = \overline{1, m}$.

Визначене за формулою (7) значення $F_{розр}$ порівнюється з табличним $F_{табл}$ за кількості ступенів свободи (f), необхідних для знаходження значень критерію Фішера і номінальному рівні значимості $\alpha=5\%$. При цьому необхідне виконання умови $F_{розр} > F_{табл}$.

Значення t – критеріїв використовуються для визначення значимості кожного параметра (X_i) у отриманих математичних моделях і дозволяють ранжувати відповідні параметри за величиною їхнього впливу на математичну модель у цілому.

Перевірка статистичної значимості параметрів регресійного рівняння (коефіцієнтів регресії) виконується за t – критерієм Ст'юдента, який розраховується за формулою:

$$t_p = \frac{|P|}{S_p}, \quad (8)$$

де P – значення параметра;

S_p – стандартне відхилення параметра.

Розраховане значення критерію Ст'юдента порівнюють з його табличним значенням за обраної довірчої імовірності (як правило, 0,95) і числі ступенів свободи $N-k-1$, де N – число точок, k – кількість змінних у регресійному рівнянні. Значення t – критерію дозволяють ранжувати відповідні параметри за величиною їхнього впливу на математичну модель у цілому.

Значення критеріїв Ст'юдента та Фішера для математичної регресійної моделі (2) БВУ у випарному відділенні цукрового заводу, де використовувались технологічні показники наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Значення критеріїв Ст'юдента та Фішера для математичної моделі багатокорпусної ВУ (1-й варіант)

Умовні позначення параметрів	Рівень соку		t – критерій табл.	$F_{табл}$.
	t – критерій розрахунковий	$F_{розр}$.		
X_1	3,57	231,7	2,78	4,36
X_2	4,69			
X_3	2,86			
X_4	3,25			
X_5	2,82			

Значення для критеріїв Ст'юдента свідчать, що в усіх випадках розрахункове значення більше табличного. Це означає, що для розроблених математичних моделей управління параметрами



технологічних процесів випарювання всі значення коефіцієнтів параметрів за ступенем їхнього впливу мають значення, і їхні значення повинні бути враховані при розрахунку управляючого параметру. Порівнюючи значення критеріїв Фішера можна побачити, що $F_{розр} > F_{табл}$ виконується. Це означає, що математичні моделі, у першому наближенні, можна використовувати для управління параметрами ВУ в АСУТП цукрового заводу.

Значення критерію Фішера для отриманої регресійної моделі (3) для процесу з якісними показниками дорівнює $F_{розр} = 162,3$ при $F_{табл} = 4,36$, а значення критерію Ст'юдента $t_{розр} = 3,67$ при $t_{табл} = 2,78$.

Порівнюючи значення критеріїв Фішера можна побачити, що умова $F_{розр} > F_{табл}$ теж виконується. А математичні моделі, у першому наближенні, також можна використовувати для управління параметрами ВУ.

Вплив якісних показників ТП випарювання на роботу ВУ.

При визначенні ефективності роботи випарної станції можна відмітити, що всі недоліки в роботі обладнання і невідповідності в режимах роботи ВУ призводять до зниження енергоефективності цукрового виробництва і зниження якості продукції, що випускається. Ефективність цукрового виробництва на заводах України, що характеризується коефіцієнтом заводу і показує ступінь отримання цукру та характеризує роботу всіх відділень заводу, знаходиться у межах 0,80 – 0,9, тоді як у Європі цей показник знаходиться у межах 0,9 – 0,96 [2–4, 15].

Одним з факторів, що знижує продуктивність цукрового виробництва, є розбалансованість якісних і технологічних показників виробництва. Наприклад, при виконанні ТП не враховуються показники якості, а тільки технологічні фактори. Значна кількість показників якості цукру вітчизняними ДСТУ не регламентується. Визначення каламутності здійснюється відповідно ДСТУ 4866:2007 /ГОСТ 125720 2007 «Методи визначення кольоровості і каламутності», але при керуванні ТП за допомогою АСУ ці дані не беруться до уваги. Зарубіжні організації – споживачі цукру для гарантії якості вироблених продуктів контролюють показник каламутності. Коливання значення цього показника допускається в межах від 12 до 157 фіз. од. для цукру-піску різних виробників.

Зробивши порівняльну оцінку критеріїв якості, які використовують на зарубіжних та вітчизняних підприємствах по виробництву напоїв і ДСТУ 4623:2006, можна відмітити, що кореляційна залежність є [8].



При цьому варто зазначити, що вищевизначені проблеми взаємопов'язані, і вирішувати їх треба комплексно. Отже, оптимізація процесу повинна здійснюватись за рахунок втілення автоматизованих систем управління (АСУТП), що ґрунтуються на застосуванні сучасного технічного, програмного та математичного забезпечення [1, 16]. Основним кроком до вирішення задачі оптимізації процесу випарювання є визначення реальних математичних моделей виробництва, які б повністю і адекватно характеризували процеси, що досліджуються у цукровому виробництві [12, 15, 16].

Висновки. Встановлено, що основними технологічними показниками, які впливають на процес випарювання і використовуються в АСУТП, є температура соку, тиск пари, витрати соку та пари, рівень соку у ВУ. Також до основних показників, які впливають на технологічний процес випарювання, варто віднести і показники якості, такі як кольоровість, каламутність, що використовуються при визначенні показників якості цукру. Побудовано регресійні математичні моделі роботи ВУ, де були враховані технологічні та якісні показники процесу випарювання соку. Розроблені моделі процесу випарювання, основані на технологічних та якісних показниках процесу, дозволяють оптимізувати час випарювання, а це дозволить підвищити енергоефективність та забезпечити більш високу якість продукції. Встановлено, що розроблені математичні моделі для автоматизованого управління параметрами технологічного процесу випарювання з 95 % вірогідністю адекватні за критерієм Фішера та ефективні, і їх можна використовувати в АСУТП цукрового заводу.

Список використаних джерел

1. Координація функціонування технологічних дільниць цукрового заводу з урахуванням задач прогнозування / *А. П. Ладанюк* та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2006. № 6. С. 112-115.
2. Енергозбереження на цукрових заводах України / *К. О. Штангеев* та ін. *Цукор України*. 2014. № 2 (98). С.14-17.
3. *Штангеев К. О.* Випарні установки та теплові схеми цукрових заводів. Київ, 2015. 57 с.
4. ПУП 15.83-37-106:2007. Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру із цукрових буряків. Київ, 2007. 432 с.
5. Екологічні аспекти контролю якості цукру у харчових виробництвах: звіт про науково-дослідну роботу № 28-08-10Б / керівник теми Непочатих Т. А. ХДУХТ, 2010. 115 с. URL:



<http://library.nuft.edu.ua/ebook/file/zvit28-08-10b.pdf> (дата звернення: 12.01.2019).

6. Кухар В. Н., Чернявская Л. И. Мутность растворов сахара и методы ее уменьшения. *Сахар*. 2014. № 3. С. 38–44.

7. Скорик К. Д. Вплив порушень технологічних режимів виробництва на якість цукру. URL: http://www.ipdo.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=433&Itemid=10&lang=uk (дата звернення: 12.01.2019).

8. ДСТУ 4623:2006. Цукор білий. Технічні умови. [Чинний від 2007-07-01]. Київ, 2007. 18 с.

9. Хомічак Л. Причини утворення і способи попередження інкрустації на теплотехнологічному обладнанні бурякоцукрового виробництва. *Науку у виробництво*. 2017. № 3. URL: http://sugar-journal.com.ua/custom/files/Vestnik_ua/2017/09/4-10.pdf (дата звернення: 12.01.2019).

10. Методы классической и современной теории автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова. Москва, 2004. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. 614 с.

11. Wenbo Na. Control system for continuous soaking process in sugar refinery. *2009 International Conference on Information and Automation*. 2009. P. 254-258. DOI: 10.1109/ICINFA.2009.5204931.

12. George S., Kyatanavar D. Optimization of Evaporation Process in Sugar Industry for Developing Intelligent Control Strategies. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. 2015. № 7. P. 998–1004.

13. Chantasiriwan S. Determination of optimum vapor bleeding arrangements for sugar juice evaporation process. *Food process engineering*. 2017. № 41 (1). P. 1-8. DOI: 10.1111/jfpe.12616.

14. Chantasiriwan S. Investigation of Performance Improvement of the Evaporation Process in Raw Sugar Manufacturing by Increasing Heat Transfer Surfaces. *Chemical Engineering Communications*. 2017. Vol. 204, № 5. P. 599-606. DOI: 10.1080/00986445.2017.1292260.

15. Ляшенко С. А. Автоматизация процессов управления технологическими отделениями сахарного производства на основе нейросетевого подхода: дисс. ... д-ра техн. наук. Харьков, 2015. 417 с.

16. Прокопенко Т. О. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними об'єктами в умовах невизначеності та ризиків: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 2016. 48 с. URL: http://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/21997/1/AVTOREF_PROKOPENKO_2016.pdf (дата звернення: 20.01.2019).



17. *Shaw J. A.* Process Control. *Process Plant Equipment* / eds M. D. Holloway, C. Nwaoha and O. A. Onyewuenyi. 2012. DOI: 10.1002/9781118162569.ch21.

18. Statistical Process Control Methods. Bloomsbury Publishing. (Ed.). QFINANCE Calculation Toolkit. 2013. London: Bloomsbury Information Ltd. P. 239–241. URL: <http://dx.doi.org/10.5040/9781472920294.0089> (Last accessed: 20.01.2019)/

19. *Сарычев А. П.* Усредненный критерий регулярности в методе группового учета аргументов. *Системные технологии*. 2015. № 2 (97). С. 45-56. URL: http://st.nmetau.edu.ua/journals/97/6_a_ru.pdf (дата звернення: 20.01.2019).

20. British Standards Document. BS ISO 22514-8. Statistical methods in process management. Capability and performance. Machine performance of a multi-state production process. 2014. URL: <https://doi.org/10.3403/30265649U> (Last accessed: 20.01.2019).

21. *Zambom A. Z, Kim J.* Consistent significance controlled variable selection in high-dimensional regression. *Stat.* 2018. 7:e210. DOI: [org/10.1002/sta4.210](https://doi.org/10.1002/sta4.210).

22. *Frees E.* Variable Selection. In *Regression Modeling with Actuarial and Financial Applications* (International Series on Actuarial Science, Cambridge: Cambridge University Press. 2009. P. 148-188. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/regression-modeling-with-actuarial-and-financial-applications/variable-selection/A5EEE96B713237E8275EB6308A97DCCB> (Last accessed: 20.01.2019).

23. *Gutenko D.* Selecting quasi-constant weight code parameters for systems of automatics. *Czasopismo Techniczne*. 2018. № 10. P. 119-126.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ СОКА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Ляшенко С. А., Кись В. Н., Фесенко А. М., Ляшенко А. С.

Аннотация - рассмотрены проблемы неэффективной работы сахарных заводов в Украине, а также, соответственно, и влияние работы выпарного отделения сахарного завода, которое обеспечивает паром все основные производства завода, на энергоэффективность свекло-сахарного производства. Проведенным исследованием определено влияние технологических и технических параметров работы многокорпусных выпарных установок, которые работают по разным схемам выпаривания, на работу всего сахарного завода. Рассмотрена энергоэффективность процесса выпаривания в разных типах



выпарных установок и определены перспективные подходы для решения проблемы энергопотребления и энергораспределения.

Определены характерные конструктивные и технологические особенности оборудования многокорпусных выпарных установок, которые используются при разных схемах процесса выпаривания сока. Сделан анализ влияния качественных показателей технологического процесса выпаривания на качество выпускаемой продукции. Показаны пути решения проблем, которые возникают при снижении качества продукции и эффективности производства сахара, если не учитываются свойства перерабатываемого сырья в течении всего технологического процесса выпаривания.

Определены проблемы в работе автоматизированных систем управления технологическим процессом выпаривания. В связи со сложностью процесса выпаривания сока в многокорпусной выпарной установке и влиянием различных показателей процесса как технологического, так и качественного характера определены основные векторы процесса управления в автоматизированных системах управления технологическим процессом выпаривания сока. Для решения этой проблемы рассмотрен довольно эффективный подход использования и построения простых регрессионных математических моделей, которые можно применять в математическом обеспечении автоматизированных систем управления. Построены математические модели работы многокорпусной выпарной установки, где учитываются как показатели технологического характера, так и показатели качественного характера выпускаемой продукции, и которые применяются в автоматизированных системах управления технологического процесса сахарного завода. Обоснована эффективность предложенных моделей для работы в системе автоматизированного управления процессом выпаривания. Следовательно, есть основание утверждать, что полученные регрессионные математические модели, где учтены как показатели технологического характера, так и показатели качества сока в первом приближении можно использовать в системе автоматизированного управления выпаривая сока.

Ключевые слова: математическая модель, показатели качества, многокорпусная выпарная установка, критерии эффективности, технологический процесс, автоматизированная система управления.

DETERMINATION OF THE JUICE EVAPORATION MATHEMATICAL MODELS EFFICIENCY FOR AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS

S. Liashenko, V. Kis, A. Fesenko, A. Liashenko

Summary

The problems of low efficiency of sugar mills in Ukraine are identified. The focus was made on the impact of the evaporation stage as a main branch of a sugar mill, which provides steam for entire mill's production, on the energy efficiency. The study determined the influence of technological and technical parameters of an evaporator on the work of an entire sugar mill. The energy efficiency of the evaporation in the different types of evaporators is considered and promising approaches to solve the problem of energy consumption are determined.



The typical structural and technological features of equipment for evaporators which are used in different schemes of the juice evaporation are given. It was determined there are both the technological indicators of the juice evaporation (temperature, pressure, juice and steam consumption, juice level in evaporators), and quality indicators that characterize the juice and the syrup (solids, alkalinity, good quality, turbidity, color, etc). The analysis of the influence of qualitative indicators of the evaporation technological process on quality of the products is made. The ways of solving the problems are determined which can occur when the product quality decreases and the efficiency of sugar production falls, if the properties of the processed raw materials are not taken into account during the whole technological process.

The problems in the work of evaporation automated process control systems are considered. Due to the complexity of the juice evaporation in an evaporators and the influence of both various technological and qualitative process indicators, we identified the main vectors of the control process in automated process control systems of the evaporation. To solve this problem we offer an approach to the effective use and elaboration of simple regression mathematical models that can be applied in the mathematical support of the specific control process systems. Mathematical models of the evaporator operation were worked out, where both technological and qualitative indicators of the products are taken into account, and which are used in the automated process control systems of a sugar mill. The efficiency of the proposed models for operation in the automated process control systems of the evaporation process is substantiated. So there is reason to argue that the resulting regression model which takes into account the quality indicators of the juice can be used in the first approximation in the automated process control system of a sugar mill.

Keywords: Mathematical model, criteria of efficiency, technological process, evaporation, automated process control system.