

УДК 664.1:681.5: 519.71

Побудова математичних моделей різних схем процесу випарювання соку для автоматизованих систем управління

С.О. Ляшенко, А.М. Фесенко, О.С. Ляшенко

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка (м.Харків, Україна)
e-mail: lyashenkosa05@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8304-9309,
e-mail: alla.ecology3006@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3950-3604,
e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua, ORCID: 0000-0002-0146-3934*

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 за різними схемами випарювання, на роботу всього цукрового заводу. Розглянуто енергоефективність процесу випарювання у різних типах випарювальних установок та встановлено перспективні підходи до вирішення цієї проблеми енергоспоживання та енергорозподілу.

Визначено характерні конструктивні та технологічні особливості технологічного обладнання багатокорпусних випарних установок, що використовуються при різних схемах процесу випарювання соку. Показано вплив технологічних показників процесу випарювання (температура, тиск, витрата соку та пари, рівень соку у випарній установці), а також показників якості (сухі речовини, лужність, доброякісність, каламутність, кольоровість тощо) на якість продукції. Зроблено аналіз впливу якісних показників технологічного процесу випарювання на якість продукції, що випускається. Показано шляхи вирішення проблеми зниження якості продукції і ефективності виробництва цукру, що можуть виникати при неврахуванні показників якості сировини у процесі випарювання.

Визначено проблеми в роботі автоматизованих систем управління технологічним процесом випарювання. Визначено основні вектори процесу управління з урахуванням складності технології випарювання і впливу різних технологічних і якісних показників для удосконалення автоматизованих систем 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 технологічні показники, 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.*

Вступ. Однією з найважливіших задач буряко-цукрового виробництва в Україні є забезпечення населення цукром. Буряко-цукрове виробництво є досить складним комплексом, що відноситься до основних галузей агропромислового комплексу держави. Буряко-цукрове виробництво структурним елементом переробної галузі сільського господарства і виявляється одним з найбільш складних та затратних з точки зору використання пару та енергії, а це впливає на собівартість продукції.

Буряко-цукрове виробництво характеризується такими показниками як якість, енергоефективність, собівартість продукції. Ефективність за цими

показниками забезпечується використанням найсучасніших технологій виробництва, обладнання, автоматизованих систем управління процесами та обладнанням, а також науковою організацією цукрового виробництва [1, 2].

Одним з найбільш енергозатратних етапів виробництва цукру є випарювання цукрового соку у багатокорпусній випарній установці (БВУ). Враховуючи складність і низьку ефективність цього процесу актуальним завданням є втілення додаткових показників технологічного процесу (ТП), що носять якісний характер, в систему автоматизованого управління випарного відділення. Впровадження ефективного управління процесом

випарювання здійснюється шляхом введення регресійних моделей, що враховують якісні та технологічні показники соку, перероблюваного на багатокорпусній випарній установці цукрового заводу, у математичне забезпечення АСУ ТП.

Аналіз стану справ та постановка проблеми. Цукровий завод є високоефективним та складним об'єктом, що має значну кількість виробничих процесів. Залежно від якості сировини у ході переробки продукції оператори часто бувають вимушені змінювати технологічну схему відповідно до змін технологічних показників та показників якості і кількості продукції за допомогою АСУ ТП [3].

Більшість технологічних процесів отримання цукру на заводі супроводжуються значним споживанням теплової енергії. Основним відділенням цукрового заводу, що приймає свіжу пару від ТЕЦ і забезпечує всі інші відділення заводу паром на технологічні потреби, є випарне з основним його обладнанням – випарною установкою (ВУ). Тому для цукрових заводів України стратегічний напрямок економії – зменшення споживання свіжої пари у технологічному процесі випарювання. Класична технологічна схема випарювання соку полягає в тому, що очищений сік має бути згущений у БВУ від початкової концентрації 10...16 % вмісту сухих речовин (СР) до 65...75 % СР. Свіжа пара з ТЕЦ має подаватися тільки на обігрів першого корпусу випарної установки. Другий корпус обігривається вторинною парою I корпусу, III – вторинною парою II корпусу і т.д. [3, 4].

На сучасних цукрових заводах 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 установки з природною циркуляцією, що мають досить високі технічні та технологічні показники. Найбільша ефективність виробництва цукру забезпечується за певного, оптимального рівня соку, що регулюється автоматично і залежить перш за все від концентрації соку, каламутності та кольоровості [3, 4].

Недоліками таких апаратів є обмеження по висоті теплообмінних труб і діаметру корпусу. Крім того у процесі випарювання, для економії паливно-енергетичних ресурсів, підвищують концентрацію сиропу до рівня 70...75 % вмісту сухих речовин (СР). Але при цьому теплотехнічні характеристики ВУ погіршуються. Іншим недоліком ВУ з природною циркуляцією є відносно значний питомий об'єм соку, це збільшує тривалість його перебування в апараті під дією високих температур.

Як наслідок, є погіршення якості сиропу, а отже, і підвищення кольоровості та вмісту редукувальних речовин у готовій продукції [4].

Важливими показниками, 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 [5].

В процесі випарювання різні органічні та неорганічні речовини, які містяться у соці та утворюються при згущенні та уварюванні сиропу, впливають на якість продукції. Їх концентрація обумовлює кольоровість продукту і залежить від параметрів проведення цих процесів. Відповідно, для отримання готової продукції високої якості необхідно проводити оперативний контроль не тільки кольоровості готової продукції, але й ретельний поточний контроль кольоровості продуктів виробництва [1, 2, 6, 7].

Зростання вмісту забарвлених речовин залежить від рН середовища, температури, тривалості і гідродинаміки процесу, питомої поверхні ВУ, конструктивних особливостей апаратів та організації виробництва [7].

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 [7, 8].

Під час випарювання 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 властивості буряка 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. Найбільш поширеним способом є хімічне очищення. Очищення поверхонь нагріву ВА від накипу відносять до трудомістких робіт. Але більш актуальними у наш час і найпоширенішими є способи попередження накипу-утворення у випарній установці без зупинки її роботи. З цією метою і за кордоном, і в Україні використовують реагенти, так звані антинакипини, що додають у сік, який подається на ВУ [3, 9].

Аналіз режимів роботи ВУ на цукрових заводах свідчить, що основні показники роботи (температура, тиск та витрати пари, температура кипіння соку, питомі поверхні теплообміну тощо) змінюються з часом. Це є підставою для коригування режимів роботи ВУ і застосування сучасних АСУТП, що базуються на досягненнях сучасної науки [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 шляхами забезпечення ефективної системи енерговикористання є:

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

Відповідно, 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 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 [11].

Ефективність роботи ВУ неможлива без автоматизованого контролю та регулювання її технологічних параметрів, як у кінці ТП випарювання, так і впродовж процесу. Зокрема, авто-

матизація ВУ має забезпечити: підтримання оптимальних рівнів у корпусах ВУ, контроль теплотехнічних, якісних та технологічних параметрів, а також надійність та безпеку виробничого процесу, тому що процес випарювання відноситься до процесів з підвищеною небезпекою [10-12].

Існує значна кількість наукових розробок, де пропонується оптимізувати технологічний процес ВУ цукрового заводу шляхом впровадження різноманітних математичних моделей для автоматизованих систем управління. При цьому забезпечується скорочення енергоспоживання за умов врахування як вхідних параметрів витрати соку та заданої температури нагрівання. Але дуже часто моделі не враховують все показники процесу, не всі моделі випробуються у виробничих умовах та не враховуються особливості складу сировини, що переробляється, або бувають занадто складними і їх важко адаптувати в АСУТП [12].

У роботі [2] 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 не вирішеним залишається питання коригування подачі пари та часу випарювання за умов зміни якості буряку, що надходить на переробку. Дослідження є доповненням аналізу [4], що фокусується на взаємодії теплообмінників і випарних апаратів, не заглиблюючись у технологічні аспекти процесу виробництва цукру.

Крім цього важливими недоліками існуючих 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 умов зміни технологічної схеми чи збільшення виробничих потужностей і т.д.) [11, 12].

Фактично усі існуючі АСУ цукрового виробництва не відповідають у повній мірі сучасним викликам. Зокрема, вони направлені на автоматизацію окремих відділень на основі ПІД-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. Відповідно до цього виникає необхідність зміни концепції щодо створення АСУТП цукрового виробництва за рахунок впровадження

системного підходу щодо універсалізації та інтелектуалізації методів і засобів математичного та програмного забезпечення [12, 14].

Ціль і задачі.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи автоматизованої системи управління процесу випарювання у багатокорпусній випарній установці за рахунок побудови математичних моделей цього процесу, що враховують якісні та технологічні показники соку за різних схем роботи випарної установки.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначити основні показники, що впливають на роботу ВУ та побудувати регресійну математичну модель роботи БВУ, де б застосовувались технологічні показники процесу випарювання, і модель, де б враховувались і показники якості у технологічному процесі випарювання за різних схем;

- обґрунтувати ефективність запропонованих моделей роботи БВУ.

Побудова математичних моделей для процесу випарювання у БВУ цукрового заводу для математичного забезпечення АСУТП.

Математичне забезпечення АСУТП реалізується вибором ефективного математичного моделювання процесів і 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 давати змогу реально визначати кількісні оцінки якісних, технічних або технологічних показників об'єкту, що розглядається.

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

Одним з важливих показників, що можуть 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» [5].

Технологічні значення показників процесу випарювання були визначені за допомогою приладів, що контролюють процес випарювання у ВУ (концентратомір, рефрактомір, рН - метр, і т.д.), а також за даними виміральної лабораторії заводу.

Крім технологічних показників процесу випарювання були використані показники технічного характеру, як то поверхня нагріву кипятильних труб, рівень соку у трубах, коефіцієнт теплопередачі і т.д.

Випарна установка як об'єкт автоматизованого управління технологічним процесом, характеризується рядом векторів, які загалом визначаються як вхідні, вихідні, збурення та інформаційні.

Визначальними факторами вихідного вектора, який впливає на якісні показники цукру, є якість та кількість сиропу, що виходить з БВУ, і характеризується такими показниками як щільність, каламутність, кольоровість, зольність та інші. Щоб отримати цукор доброї якості (дБ), чистота сиропу при виході з ВУ повинна бути близькою до 92% [1, 3, 5].

При моделюванні процесу випарювання для визначення впливу цих векторів на об'єкт автоматизованого управління – випарну установку, необхідно визначити повний склад найбільш важливих показників ТП. З цією метою будемо загальну структурну схему взаємодії векторів, що визначають функціонування ВУ як об'єкта для системи автоматизованого управління.

На основі проведеного аналізу здійснювався попередній відбір найбільш значущих показників ТП для ефективності цукрового виробництва. Також було запропоновано структурну схему показників (рис. 1), що визначають функціонування ВУ як об'єкта для АСУТП всього заводу.

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 каламутність 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 на кипятильних трубах ВУ. Інформаційний вектор (I) надає значення факторів груп X, Y, U, Z в АСУТП та порівнює зі значеннями оптимізованих параметрів режимів роботи БВУ і, як результат, система автоматизованого контролю здійснює керувальний вплив на режими роботи БВУ. 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.

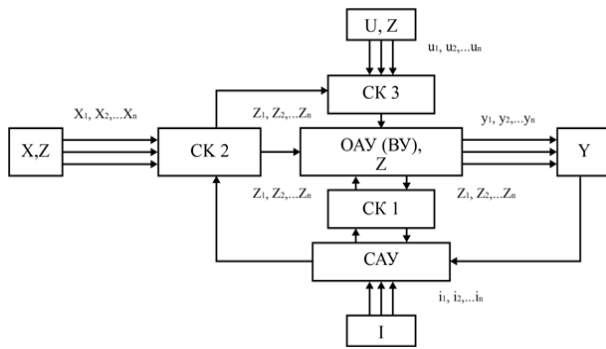


Рис. 1. Загальна структурна схема факторів, що визначають функціонування ВУ як об'єкта для автоматизованого управління: X – вхідний вектор; Y – вихідний вектор; U – вектор керування; Z – вектор збурень; I – інформаційний вектор; OAY – об'єкт автоматизованого управління ВУ; CAУ – система автоматизованого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

Процес випарювання – динамічний процес, що вимагає при побудові математичної моделі визначення показників процесу та взаємозв'язку між ними. Ці дані необхідні для створення ефективною системи автоматизованого управління процесами роботи БВУ. Типова схема АСУТП для випарювання соку, яка дає можливість здійснювати управління та регулювання ТП датчиків, складається з приладів, що контролюють технічні, технологічні та якісні показники; контролерів, куди надходять сигнали про стан об'єкта керування, і де здійснюється керування процесом, відповідно до розробленого математичного забезпечення; а також база у ПЕОМ.

У ПЕОМ вводяться дані лабораторних аналізів продукції, а також розраховані проміжні дані технологічного процесу. Введення даних з датчиків і результатів лабораторних аналізів та розрахункових даних у ПЕОМ, а також характеристик теплових режимів роботи БВУ дає можливість за допомогою контролера здійснювати управління ТП випарювання.

У процесі досліджень було розглянуто роботу багатокорпусних випарних установок, що працюють за двома найбільш сучасними і економічними схемами випарювання соку на цукрових заводах:

Робота БВУ за схемою 1. Використовувались лише технологічні показники процесу і підігрівання соку, що подається на ВУ, подача соку здійснювалася відповідно до типової схеми роботи – через підігрівачі на перший корпус ВУ.

Робота БВУ за схемою 2. Використовувались технологічні та якісні показники процесу і підігрівання соку, що подається на ВУ, подача соку здійснювалася відповідно до удосконаленої типової схеми роботи – через четвертий корпус БВУ.

Схема роботи БВУ 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 БВУ.

Крім цього, інформаційними показниками БВУ є рівень у збірнику соку перед ВУ, температура у гріючій камері 1-го корпусу, рівень у збірнику сиропу, тиск у надсоковому просторі 1-5-го корпусів ВУ і т. далі. Інформаційні показники часто використовують при проведенні розрахунків фактичних та орієнтованих значень показників процесу випарювання.

Основні оптимальні дані технологічних змінних режиму роботи для багатокорпусної випарної установки наведені у табл. 1.

При побудові моделей ТП випарювання у цукровому виробництві використовувались прості регресійні моделі, що описуються рівнянням

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

де Y_j – залежні змінні, $j = \overline{1, m}$, при цьому $m < \overline{k}$; 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 [15, 16].

Застосування МНК дало можливість отримати наступну регресійну модель для ВУ

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

Схема роботи БВУ 2. По аналогії з вищевказаним 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 технологічно-якісних змінних режиму роботи випарної установки наведені у табл. 2.

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:

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

Таблиця 1 Дані оптимальних технологічних змінних режиму 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, Y (% до м.б.)
		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

Таблиця 2. Дані оптимальних технологічно-якісних змінних режиму роботи випарної установки

Рівні оптимального режиму роботи	Витрата соку до ВУ, Q , % до м.б., X_1 .	Температура соку та сиропу, °C, X_2 .	Сухі речовини, %, X_3	pH, X_4	Каламутність соку, фіз. од. мг/м ³ , X_5	Температура пари на ВУ, °C, 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

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

5. Обґрунтування значимості та адекватності запропонованих моделей роботи БВУ

У різних вузлах ВУ відбуваються принципово різні за своєю природою процеси технологічного, технічного або хімічного характеру. 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 [17].

За результатами експериментальних даних, що були отримані при процесі випарювання 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 [14]. Медіана Med_x розраховується як стала оцінка центра експериментальних даних з викидами, що мінімально на неї впливають.

В основному 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) [18 - 21].

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:

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

де

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

$$\sigma_S^2 = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2;$$

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

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.

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.

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 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 БВУ.

Визначення впливу якісних показників ТП випарювання на роботу БВУ та якість подукції. 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 [1, 2, 4, 13].

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. 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].

Відповідно необхідно 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, 3]. Основним кроком до вирішення задачі оптимізації процесу випарювання є визначення реальних математичних моделей виробництва, які б повністю і адекватно характеризували процеси, що досліджуються при випарюванні у цукровому виробництві [10–12].

Висновки.

В результаті проведених досліджень необхідно відзначити наступні складові роботи:

1. Визначено, основні технологічні показники, що впливають на процес випарювання і використовуються в АСУТП. До них відносяться: температура соку, тиск пари, витрати соку та пари, рівень соку у ВУ.

2. Визначено вплив основних якісних показників технологічного процесу випарювання. До них треба віднести: кольоровість, каламутність, рН, які використовуються при визначенні показників якості цукра за кордоном.

3. Побудовано регресійну математичну модель роботи ВБУ, що працювала за схемою випарювання соку з концентратом, де було враховано вплив технологічних показників випарювання на витрати соку, і регресійну модель, що враховує не лише технологічні, а й показники якості соку, що переробляється. Розроблені моделі процесу випарювання дозволяють оптимізувати час випарювання, що дозволить підвищити енергоефективність процесу та забезпечити високу якість отриманої продукції.

4. Встановлено, що розроблені математичні моделі можна використовувати для автоматизованого управління параметрами технологічного процесу випарювання, з 95% вірогідністю вони адекватні за критерієм Фішера та ефективні, і їх можна використовувати, у першому приближенні, в АСУТП цукрового заводу.

Література

1. Координація функціонування технологічних дільниць цукрового заводу з урахуванням задач прогнозування. Ладанюк А.П. і ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2006, №6. – С. 112-115.

2. Chantasiriwan S. Determination of optimum vapor bleeding arrangements for sugar juice evapo-

ration process//Food process engineering. [Електронний ресурс] – 2017, №41 (1). – С. 1-8. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12616>

3. Штангеев К.О. Випарні установки та теплові схеми цукрових заводів. – Київ, 2015. – 57 с.

4. Chantasiriwan S. Investigation of Performance Improvement of the Evaporation Process in Raw Sugar Manufacturing by Increasing Heat Transfer Surfaces// Chemical Engineering Communications. [Електронний ресурс] – 2017. № 204, Issue 5. – С. 599-606. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1292260>

5. ПУП 15.83-37-106:2007. Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру із цукрових буряків. – Київ, 2007. – 432 с.

6. Звіт про науково-дослідну роботу № 28-08-10Б «Екологічні аспекти контролю якості цукру у харчових виробництвах» / керівник теми Непочах Т.А. [Електронний ресурс] ХДУХТ, 2010. – 115 с. – Режим доступу: <http://library.nuft.edu.ua/ebook/file/zvit28-08-10b.pdf>.

7. Скорик К.Д. Вплив порушень технологічних режимів виробництва на якість цукру. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.ipdo.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=433&Itemid=10&lang=uk.

8. ДСТУ 4623:2006. Цукор білий. Технічні умови. – Київ, 2007. – 18 с.

9. Хомічак Л. Причини утворення і способи попередження інкрустації на теплотехнологічному обладнанні бурякоцукрового виробництва [Електронний ресурс] // Науково-практичний центр цукробурякового виробництва. Науку у виробництво. 2017. №3. – Режим доступу: http://sugar-journal.com.ua/custom/files/Vestnik_ua/2017/09/4-10.pdf.

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

11. Wenbo Na. Control system for continuous soaking process in sugar refinery. [Електронний ресурс] 2009 International Conference on Information and Automation, Zhuhai, Macau, 2009. С. 254-258. – Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=5204931&isnumber=5204876>

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 – С. 998-1004.

13. Ляшенко С.А. Автоматизация процессов управления технологическими отделениями сахарного производства на основе нейросетевого подхода. Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук. – Харків, 2015. – 417 с.

14. Shaw, J. A. Process Control. In Process Plant Equipment (eds M. D. Holloway, C. Nwaoha and O.

A. Onyewuenyi) [Електронний ресурс]. 2012. – Режим доступу: doi:10.1002/9781118162569.ch21

15. Statistical Process Control Methods. In Bloomsbury Publishing. (Ed.). [Електронний ресурс] QFINANCE Calculation Toolkit. 2013. С. 239-241. London: Bloomsbury Information Ltd. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.5040/9781472920294.0089>

16. Прокопенко Т. О. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними об'єктами в умовах невизначеності та ризиків: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.13.06 «Інформаційні технології». [Електронний ресурс] Київ, 2016. 48 с. – Режим доступу: http://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/21997/1/AVTOREF_PROKOPENKO_2016.pdf.

17. Сарычев А. П. Усредненный критерий регулярности в методе группового учета аргументов [Електронний ресурс] //Системные технологии. – 2015. №2 (97). – С. 45-56. – Режим доступу: st.nmetau.edu.ua/journals/97/6_a_ru.pdf.

18. British Standards Document. BS ISO 22514-8. Statistical methods in process management. Capability and performance. Machine performance of a multi-state production process. [Електронний ресурс] 2014. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3403/30265649U>.

19. Zambom A.Z., Kim J. Consistent significance controlled variable selection in high-dimensional regression. [Електронний ресурс] Stat. 2018; 7: e210. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/sta4.210>

20. Frees E. Variable Selection. In Regression Modeling with Actuarial and Financial Applications (International Series on Actuarial Science, Cambridge: Cambridge University Press. [Електронний ресурс] 2009. С. 148-188. – Режим доступу: <https://www.cambridge.org/core/books/regression-modeling-with-actuarial-and-financial-applications/variable-selection/A5EE96B713237E8275EB6308A97DCCB>.

21. Gutenko D. Selecting quasi-constant weight code parameters for systems of automatics //Czasopismo Techniczne, 2018, №10, – С. 119-126.

References

1. Ladaniuk A., Zayets N., Vlasenko A., Lutcka N. (2006). *Koordinatsiia funktsionuvannia tekhnologichnykh dilnyts tsukrovoho zavodu z urakhuwanniam zadach prohozuvannia*. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, 6, 112-115.

2. Chantasiriwan S. (2017). *Determination of optimum vapor bleeding arrangements for sugar juice evaporation process*. J Food Process Eng. 41:e12616. 1-8. Available at: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12616>.

3. Shtanghejev K. (2015). *Vyparni ustanovky ta teplovi skhemy cukrovyykh zavodiv*. Kyiv, 57.

4. S. Chantasiriwan. (2017). *Investigation of Performance Improvement of the Evaporation Pro-*

cess in Raw Sugar Manufacturing by Increasing Heat Transfer Surfaces. J. Chemical Engineering Communications. 204, Issue 5. 599-606. Available at: <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1292260>.

5. PUP 15.83-37-106:2007 «*Pravyla vedennja tekhnologichnogho procesu vyrobnyctva cukru iz cukrovyykh burjakiv*» (2007). Kyiv, 432.

6. *Zvit pro naukovo-doslidnu robotu # 28-08-10B «Ekologichni aspekty kontrolju jakosti cukru u kharchovykh vyrobnyctvakh»* (2015), by dir. Nepochatykh T, Kharkiv, 115. Available at: <http://library.nuft.edu.ua/ebook/file/zvit28-08-10b.pdf>.

7. Skoryk K. (2014). *Vplyv porushenj tekhnologichnykh rezhymiv vyrobnyctva na jakistj cukru*. Lviv. Available at: http://www.ipdo.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=433&Itemid=10&lang=uk.

8. DSTU 4623:2006. *Cukor bilyj. Tekhnichni umovy*. (2007). Kyiv, 18.

9. Khomichak L. (2017). *Prychyny utvorennja i sposoby poperedzhennja inkrustaciji na teplo-tekhnologichnomu obladnanni burjakocukrovogho vyrobnyctva* // Naukovo-praktychnyj centr cukroburjakovogho vyrobnyctva. Nauku u vyrobnyctvo., 3 Available at: http://sugar-journal.com.ua/custom/file/s/Vestnik_ua/2017/09/4-10.pdf.

10. Pupkov K., Yegupov N. (2004). *Metody klasicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya*. T. 3: Sintez reguljatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya. Moskva, 614.

11. Wenbo Na. (2009). *Control system for continuous soaking process in sugar refinery*. 2009 International Conference on Information and Automation, Zhuhai, Macau. 254-258. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5204931&isnumber=5204876>.

12. George S., Kyatanavar D. (2015). *Optimization of Evaporation Process in Sugar Industry for Developing Intelligent Control Strategies*. International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, 7, 998-1004.

13. Lyashenko S. (2015) *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya tekhnologicheskimi otdeleniyami sakharnogo proizvodstva na osnove neyrosetevogo pokhoda*. Dissertatsiya na soiskanie nauchnoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Kharkiv, 417.

14. Shaw, J. A. (2012). *Process Control*. In *Process Plant Equipment* (eds M. D. Holloway, C. Nwaoha and O. A. Onyewuenyi). Available at: doi:10.1002/9781118162569.ch21.

15. *Statistical Process Control Methods*. (2013). In Bloomsbury Publishing. (Ed.). QFINANCE Calculation Toolkit (pp. 239-241). Available at: <http://dx.doi.org/10.5040/9781472920294.0089>.

16. Prokopenko T. (2016). *Informacijni tehnologiji upravlinnja orghanizacijno-tekhnologichnymy ob'ektamy v umovakh nevyznachenosti ta ryzkykiv*: avtoref. dys. ... dokt. tekhn. nauk: spec.

05.13.06 «Informacijni tehnologiji» Kyiv, 48. Available at: http://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/21997/1/AVTOREF_PROKOPENKO_2016.pdf.

17. Sarychev A. (2015). *Usrednennyy kriteriy reguljarnosti v metode gruppovogo ucheta argumentov*. *Sistemni tehnologiyi*, 2 (97), 45-56. Available at: <chrome-extension://mhjfbmdgcfjbbpaeo-jfofohoefgiehjai/index.html>.

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

19. Zambom A Z, Kim J. (2018). *Consistent significance controlled variable selection in high-dimensional regression*. *Stat.* 7:e210. Available at: <https://doi.org/10.1002/sta4.210>

20. Frees, E. (2009). *Variable Selection*. In *Regression Modeling with Actuarial and Financial Applications (International Series on Actuarial Science, 148-188)*. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: [doi:10.1017/CBO9780511814372.006](https://doi.org/10.1017/CBO9780511814372.006)

21. Gutenko D. (2018). *Selecting quasi-constant weight code parameters for systems of automatics // Czasopismo Techniczne*. 10. C. 119-126.

Анотація

Построение математических моделей различных схем процесса выпаривания сока для автоматизованих систем управління

С.А. Ляшенко, А.М. Фесенко, А.С. Ляшенко

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 в разных схемах процесса выпаривания сока. Показано влияние таких технологических показателей процесса выпаривания сока как температура, давление, расход сока и пара, уровень сока в выпарных аппаратах, а также и показателей качества, которые характеризуют сок и сироп по следующим составляющим: сухие вещества, щелочность, доброкачественность, мутность, цветность, на качество продукции. 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 - использование и построение 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 технологическим процессом 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 технологические показатели и показатели качества сока, в первом приближении можно использовать в системе автоматизированного управления выпариванием сока.

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

Abstract

Working out mathematical models of different juice evaporation schemes for automated process control systems

S.O. Liashenko, A.M. Fesenko, O.S. Liashenko

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 production of an entire mill, 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 process in the different types of evaporators is considered and promising approaches are determined to solve the problem of energy consumption.

The typical structural and technological features of the 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, colour, etc). The analysis of the influence of qualitative indicators of the technological evaporation 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 operation of evaporation automated process control systems are considered. Due to the complexity of the juice evaporation in an evaporator and the influence of both various technological and qualitative process indicators, we identified the main management vectors in the automated process control systems of 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.*

Liashenko S.O., Fesenko A.M., Liashenko O.S. Working out mathematical models of different juice evaporation schemes for automated process control systems // *Engineering of nature management*, 2019, #2(12), p. 79 - 89.

Подано до редакції / Received: 14.03.2019