

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗОННИХ РЕГУЛЯТОРІВ

**І. С. Конох, В. В. Найда, Н. М. Істоміна, Ю. О. Краснопольська**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: icegun.ik@gmail.com

Робота присвячена досягненню оптимального режиму сушіння технічного вуглецю з точки зору матеріальних і енергетичних затрат. Був проаналізований технологічний режим сушіння на прикладі сушильного барабану Кременчуцького заводу технічного вуглецю. В результаті аналізу визначені вхідні, вихідні та впливові потоки для об'єкту сушильний барабан. Кінцевим продуктом сушильного барабану є гранульований технічний вуглець з вказаними показниками якості. Визначено що основним і критичним показником якості при цьому являється вологість оброблюваної сировини. Вона прийнята за основну фазову змінну розглянутого технологічного процесу. Для спрощення математичного опису запропоновано розділити барабан на три зони. У фізичному змісті кожна зона прив'язана до свого топкового пальника. Для покращення точності для кожної зони вибрана умовна середина, що дозволяє при отриманні математичного опису зони використовувати три точки. Також була визначена бажана фазова траєкторія зміни вологості технічного вуглецю. Для опису процесу сушіння використані аперіодичні ланки другого порядку для кожної зони. Для підтримки рівня вологості на виході кожної зони сушильного барабану використані зонні регулятори. Для забезпечення роботи зонних регуляторів була створена імітаційна модель просування порцій технічного вуглецю вздовж сушильного барабану. Ця імітаційна модель ґрунтується на розробленій схемі розрахунку ваги випаровуваної вологи на окремій ділянці. Відповідно до технологічних умов сформульований критерій якості, який забезпечує оптимальну зміну вологості продукту у функції часу. Для забезпечення критерію якості були розроблені етапи роботи топкових пальників та блок-діаграма розрахунку керуючих впливів для реалізації способу керування процесом сушіння гранульованого технічного вуглецю. Працездатність розробленого способу керування підтверджена отриманими графіками перехідних процесів регулювання вологості на окремих ділянках (зонах).

**Ключові слова:** вологе гранулювання, топкові пальники, зонний регулятор, критерій якості, нормована вологість, оптимальна фазова траєкторія.

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА С ПОМОЩЬЮ ЗОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

**И. С. Конох, В. В. Найда, Н. Н. Истомина, Ю. А. Краснопольская**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600. E-mail: icegun.ik@gmail.com

Работа посвящена достижению оптимального режима сушки технического углерода с точки зрения материальных и энергетических затрат. Был проанализирован технологический режим сушки на примере сушильного барабана Кременчугского завода технического углерода. В результате анализа определены входящие, исходящие и влияющие потоки для объекта сушильный барабан. Конечным продуктом сушильного барабана является гранулированный технический углерод с указанными показателями качества. Определено, что основным и критическим показателем качества при этом является влажность обрабатываемого сырья. Она принята за основную фазовую переменную рассматриваемого технологического процесса. Для упрощения математического описания предложено разделить барабан на три зоны. В физическом смысле каждая зона привязана к своей топочной горелке. Для улучшения точности для каждой зоны выбрана условная середина, позволяющая при получении математического описания участка использовать три точки. Также была определена желаемая фазовая траектория изменения влажности технического углерода. Для описания процесса сушки использованы аперіодические звенья второго порядка для каждой зоны. Для поддержания уровня влажности на выходе каждой зоны сушильного барабана использованы зонные регуляторы. Для обеспечения работы зонных регуляторов была создана имитационная модель продвижения порций технического углерода вдоль сушильного барабана. Эта имитационная модель основывается на разработанной схеме расчета веса испаряемой влаги на отдельном участке. Согласно с технологическими условиями сформулирован критерий качества, который обеспечивает оптимальное изменение влажности продукта в функции времени. Для обеспечения критерия качества были разработаны этапы работы топочных горелок и блок-диаграмма расчета управляющих воздействий для реализации способа управления процессом сушки гранулированного технического углерода. Работоспособность разработанного способа управления подтверждена полученными графиками переходных процессов регулирования влажности на отдельных участках (зонах).

**Ключевые слова:** влажное гранулирование, топочные горелки, зонный регулятор, критерий качества, нормированная влажность, оптимальная фазовая траектория.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Як вказано в [1] технічний вуглець широко використовується в якості наповнювача для модифікації механічних, електричних й оптичних властивостей середовища. Основними сферами використання технічного вуглецю є

виробництво гумових виробів, еластомерів, пластмаси, фарб та чорнил.

Близько 70% всього виробленого технічного вуглецю використовується у виробництві автомобільних шин, приблизно 20% у виробництві гумовотехнічних виробів [2].

Згідно з даними наявними у вільному доступі найбільшим виробником технічного вуглецю в Україні є Приватне акціонерне товариство «Кременчуцький завод технічного вуглецю» (об'єм виробництва за минулий рік більше 80 тис. тон [3]).

Технологічний процес отримання технічного вуглецю включає в себе наступні етапи виробництва [3]:

- процес приготування сировинної суміші і подача її в виробництво;
- процес отримання технічного вуглецю в хімічних реакторах;
- процес уловлювання технічного вуглецю і транспортування в ділянку обробки;
- процес вологого гранулювання і сушіння технічного вуглецю;
- процес упаковки технічного вуглецю.

Для забезпечення транспортування продукції споживачам без упаковки в спеціальну тару, вироблений технічний вуглець необхідно гранулювати. Грануляція здійснюється шляхом змішування дрібнодисперсного вуглецевого порошку з підігрітим водно-мелясовим розчином в роторному грануляторі. Після гранули технічного вуглецю сушать для видалення зайвої вологи та придбання потрібних фізичних властивостей. Таким чином, технологічний процес сушіння гранульованого технічного вуглецю є кінцевим етапом його виробництва перед відправкою споживачам [4].

Згідно з [5–7] сушка – найбільш складно керована стадія в технологічному ланцюжку, найважливіша з точки зору забезпечення стійкості динаміки перехідних процесів і стабільності технологічного режиму. Характером її проведення в істотній мірі визначаються: гранулометричний склад, вміст пилу, і ряд інших важливих для споживача показників.

У роботі [8] представлений спосіб керування процесом сушіння, із застосуванням зворотного зв'язку по температурі верхній частині топки для регулювання продуктивності пальників початкової і середньої частині барабану і зворотним зв'язком по температурі техвуглецево-газової суміші на виході барабану для регулювання продуктивності пальників кінцевої зони.

Недоліком даного способу є неможливість автоматично визначити коректні уставки температури для регуляторів кожної зони. Це обумовлено відсутністю прямого зв'язку між температурою топкових газів і температурою техвуглецево-газової суміші та вологістю вихідного продукту. Даний спосіб потребує прийняття суб'єктивних рішень оперативним персоналом з вибору уставок температури та їх зміни в процесі формування сталого режиму роботи технологічної лінії. Існуючими технічними засобами неможливо врахувати наступні фактори, які мають вплив на перебіг процесу сушіння: кінетичні властивості випаровування вологи для поточної марки техвуглецю; завантаження техвуглецем кожної умовної зони барабану; калорійність полум'я пальників; початкову середню вологість продукту при надходженні в кожну умовну зону сушильного барабану.

Мета роботи досягти зниження матеріальних і енергетичних витрат на одиницю продукції при

використанні розробленого способу керування процесом сушіння технічного вуглецю.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Технологічна лінія вологої грануляції і сушіння складається з накопичувальної ємності, пристрою дозування пиловидного вуглецю, пристрою дозування водно-мелясового розчину, гранулятора, сушильного барабану, що обертається всередині топки, пристроїв вивантаження сухого гранульованого вуглецю, системи транспортування і охолодження готового продукту, системи аспірації і пиловловлювання для видалення газів і пиловидного вуглецю із барабана і системи транспортування.

Утворення вологих гранул відбувається в грануляторі, шляхом інтенсивного перемішування порошкового вуглецю з водно-мелясовим розчином. Після волого гранулювання вуглець потрапляє із торцевого завантажувального каналу всередину сушильного барабану. Сушіння гранульованого технічного вуглецю відбувається під час його просування вздовж сушильного барабану, який встановлено під нахилом і обертається зі швидкістю 2 – 3,5 об/хв. Всередині змонтовано полиці, які забезпечують перемішування гранул і рівномірне випаровування вологи з маси продукту. Основне джерело теплової енергії – топкові пальники, що формують факели полум'я в нижньої частині топки. Теплова енергія передається стінкам барабана через випромінювання і безпосередню теплопередачу.

Вся волога, що випаровується з гранул, а також порошковий вуглець із зруйнованих гранул видаляється системою аспірації через торцевий канал з вихідної сторони барабану. Відомі модифікації сушильних барабанів, при яких частина топкових газів подається всередину барабану для інтенсифікації процесів випаровування.

Сухі гранули вивантажуються з вихідної сторони барабана і потрапляють до транспортно-охолоджувальної системи.

Розглянемо процес сушіння технічного вуглецю з позицій системного аналізу (рис. 1). Вхідним потоком при цьому є сировина для виробництва технічного вуглецю, вихідним – висушений гранульований технічний вуглець, впливовим фактором – температура, що створюється пальниками сушильного барабану.

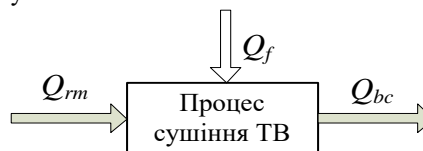


Рисунок 1 – Представлення процесу сушіння у вигляді «чорної скриньки»

Де:  $Q_{rm}$  – об'єм сировини що подається в сушильний барабан;  $Q_{bc}$  – об'єм готової продукції що відповідає вимогам якості;  $Q_f$  – об'єм палива топкових пальників, що витрачено для сушіння визначеного об'єму сировини  $Q_{rm}$ .

Вимоги якості до вихідного продукту процесу сушіння визначені наступним чином. Початкова вологість продукту складає 50-52 %, вологість гото-

вого продукту повинна знаходитись в межах 0,2-0,8 %. Коливання вологості вихідного продукту спостерігаються внаслідок змінних режимів грануляції, змінного навантаження барабану, роботи з різними марками техвуглецю, зміни параметрів повітря і режимів горіння пальників. На поточний час регулювання полум'я топкових пальників відбувається вручну, ґрунтуючись на показах датчиків та досвіді оператора. Відповідно створення автоматизованої системи керування роботи топкових пальників, що забезпечує вказані показники якості вихідного продукту є необхідним.

По довжині розділимо сушильний барабан на 7 умовних ділянок (рис. 2): 1.1 та 1.2 – перша третина барабану, що обертається всередині топки; 2.1 та 2.2 – середня третина барабану, що обертається всередині топки; 3.1 та 3.2 – остання третина барабану; 4.1 – зона вивантаження барабану. Це дозволяє спростити модельні розрахунки і структурувати процес автоматичного керування.

Основною вихідною фазовою змінною процесу є вологість. В кожній зоні сировина знаходиться визначений проміжок часу. Відповідно процес сушіння можна представити через передавальні ланки, як наведено на рис. 3.



Рисунок 2 – Спрощена схема представлення сушильного барабану

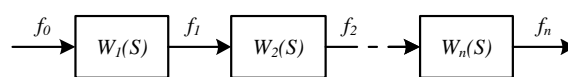


Рисунок 3 – Сукупність передавальних функцій сушильного барабану

Для кожної ділянки процесу сушіння, представленої передавальною функцією, відомі значення вхідної та вихідної нормованих вологостей технічного вуглецю:  $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ . За цими значеннями будуватиметься оптимальна фазова траєкторія сушіння.

Відповідно використання зонних регуляторів, які реагують на відхилення фактичної траєкторії сушіння від оптимальної є доцільним.

Реалізація способу керування починається з визначення бажаної траєкторії зміни вологості продукту в функції довжини барабану та в функції часу просування умовної порції продукту по сушильному барабану.

На рис. 4 показаний можливий вигляд такої траєкторії, що дозволяє визначити бажані значення вологості в окремих точках.

Сушильний барабан як об'єкт керування характеризується інерційністю, транспортною затримкою в 20-40 хвилин, що ускладнює отримання актуальної інформації системою управління про стан вихідного продукту, неможливість здійснення прямих вимірювань температури і вологості продукту всередині барабану.

Також спостерігається істотний вплив початкових умов (таких як температура вхідного техвуглецю, температура водно-мелясового розчину, початкова вологість) на перебіг процесу сушіння. Множина каналів управління вимагає їх узгодження і диспетчеризації під час формування керуючих впливів.

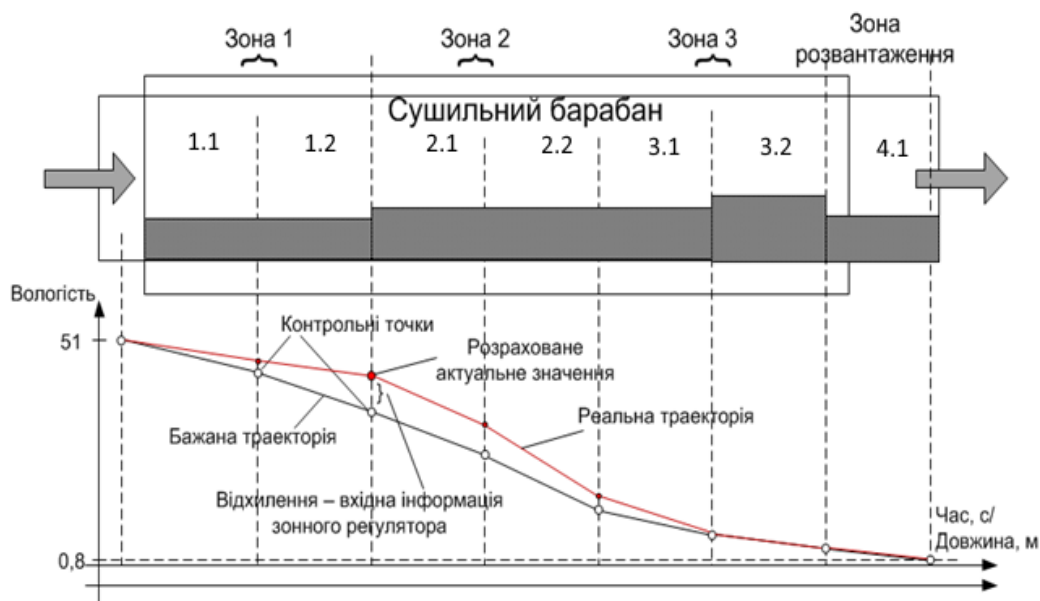


Рисунок 4 – Регулювання вологості техвуглецю в сушильному барабані на основі аналізу фазових траєкторій

Модель процесу сушіння в сушильному барабані БС-40, що використовується на виробництві ПрАТ КЗТВ, у роботі [10] апроксимована аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W(s) = \frac{k}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}$$

Вираз (1) визначає передавальну ланку, яка описує динаміку зміни вологості умовної порції продукту в часі від витрат палива в топкові пальники однієї умовної зони:

$$W(s) = \frac{200}{4500s^2 + 600s + 1} \quad (1)$$

Крім того, на загальну якість процесу впливають витрати палива і плавність випаровування вологи (рис. 5).

Використовуючи розроблену схему розрахунку ваги випаровуваної вологи була розроблена імітаційна модель просування порцій техвуглецю вздовж сушильного барабану БС-40 (рис. 6).

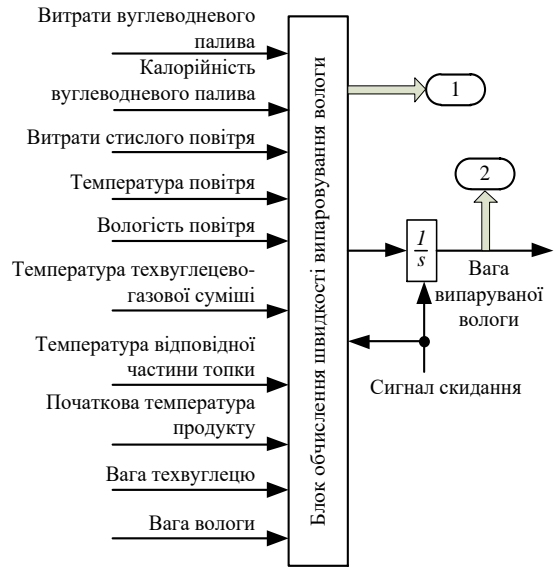


Рисунок 5 – Схема розрахунку ваги випаровуваної вологи на окремій ділянці сушильного барабану

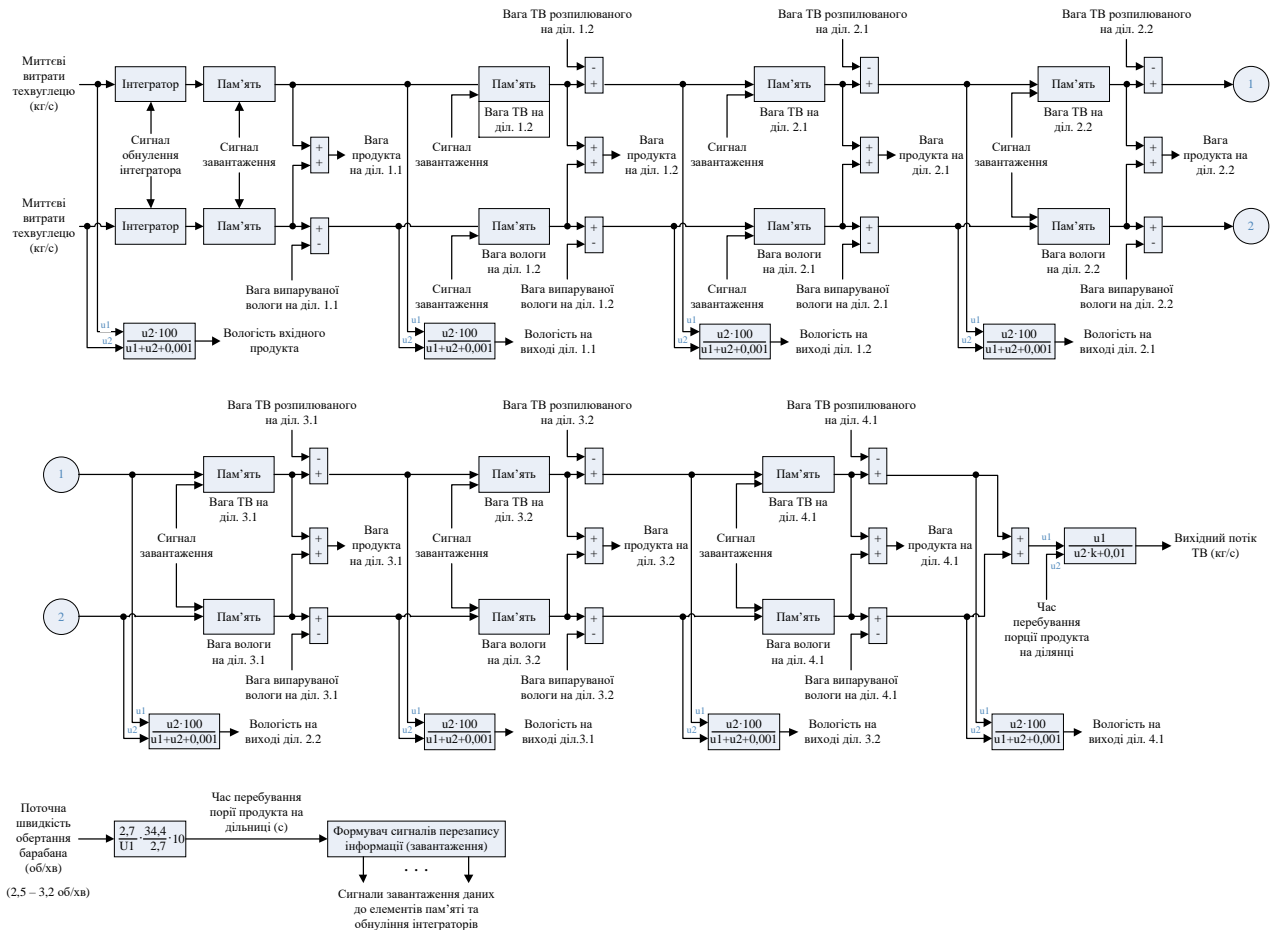


Рисунок 6 – Модель зміни завантаження і вологості матеріалу по зонах сушильного барабана

Класичний критерій якості, який формально може описати висунуті умови до процесу має наступний вигляд [11, 12]:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (q_1 y(t)^2 + q_2 \dot{y}(t)^2 + u(t)^2) dt \quad (2)$$

де  $t_0$ ,  $t_k$  – відповідно, початковий і кінцевий моменти часу проходження умовної порції продукту через

сушильний барабан;  $q_1$ ,  $q_2$  – вагові коефіцієнти, що задають ступінь впливу відповідних складових на підсумкове значення критерію;  $y$  – керована змінна (вологість) (%);  $u$  – керуючий вплив (витрати палива) ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Перша складова в підінтегральній функції відповідає мінімуму абсолютного відхилення вологості, друга – максимуму плавності перехідного процесу

(мінімуму похідної вологості), третя – мінімуму керуючого впливу (витрат палива). Обґрунтуємо наявність другої складової: занадто швидке падіння вологості приводить до росту відсотку пересушених гранул, що веде до їх руйнування або спікання і ускладнюється процес управління. Коефіцієнти  $q_1$  і  $q_2$  коригують ваги перших двох складових щодо третього з урахуванням їх важливості і застосовуваних одиниць виміру. Згідно з відомими технологічними умовами роботи сушильного барабану у числовому виді критерій якості має вигляд:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (0,0035y(t)^2 + 0,08\dot{y}(t)^2 + u(t)^2) dt. \quad (3)$$

Вирази (1) і (3) задають закон оптимальної зміни вологості продукту в функції часу. Дану залежність можливо масштабувати з урахуванням поточної кутової швидкості й отримати закон оптимальної зміни вологості в функції довжини барабану.

На рис. 7 показано можливий вигляд оптимізованої траєкторії, що дозволяє визначити бажані значення вологості в окремих точках.

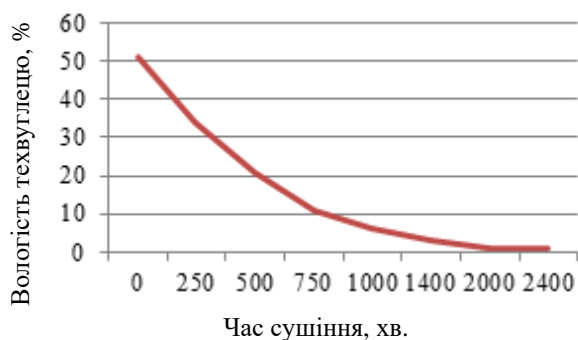


Рисунок 7 – Приклад оптимізованої фазової траєкторії зміни вологості у функції часу

Для забезпечення критерію якості (3) необхідно сформулювати режими роботи топкових пальників. При цьому наступні етапи виконуються циклічно.

*Етап 1.* Зчитування сигналів, що характеризують роботу технологічного потоку: тиск повітря на горіння, температура повітря на горіння, вологість повітря на горіння, тиск газу, ступінь відкриття пальникових клапанів повітря і газу, витрати порошкового техвуглецю і водно-мелясового розчину в гранулятор, температура в окремих зонах топки, температура техвуглецево-газової суміші, що видаляється з барабану, температура вихідного гранульованого техвуглецю.

*Етап 2.* Розрахунок кількості випарованої рідини на кожній ділянці барабану на основі розробленої схеми (рис. 5).

*Етап 3.* На основі імітаційної моделі (рис. 6) розрахунок показників продукції (вага матеріалу, температура речовин і кількість випарованої вологи).

*Етап 4.* Розрахунок розбіжності між оптимальною і фактичною фазовими траєкторіями сушіння (рис. 4). Розузгодження вологості для кожної зони обчислюється по трьом точкам. Для кожної зони можна визначити 3 характерні точки – вологість

матеріалу на вході в зону, вологість матеріалу в середині зони, вологість матеріалу в кінці зони.

Для регулятора вологості першої зони можна виділити наступні вхідні сигнали:

- вологість гранульованого техвуглецю на вході в сушильний барабан;
- вологість техвуглецю на виході ділянки 1.1;
- вологість техвуглецю на виході ділянки 1.2;
- початкова вологість техвуглецю, яка була задана під час проведення пошуку оптимальної траєкторії;
- бажана вологість на виході ділянки 1.1;
- бажана вологість на виході ділянки 1.2.

Для регулятора вологості другої зони можна виділити наступні вхідні сигнали:

- вологість гранульованого техвуглецю на вході ділянки 2.1, яка дорівнює вологості на виході ділянки 1.2;
- вологість техвуглецю на виході ділянки 2.1;
- вологість техвуглецю на виході ділянки 2.2;
- бажана вологість на виході ділянки 1.2;
- бажана вологість на виході ділянки 2.1;
- бажана вологість на виході ділянки 2.2.

Для регулятора вологості третьої зони можна виділити наступні вхідні сигнали:

- вологість гранульованого техвуглецю на вході ділянки 3.1, яка дорівнює вологості на виході ділянки 2.2;
- вологість техвуглецю на виході ділянки 3.1;
- вологість техвуглецю на виході ділянки 3.2;
- бажана вологість на виході ділянки 3.1;
- вологість температура вихідного продукту;
- бажана вологість на виході ділянки 3.2;
- бажана вологість/температура вихідного продукту;
- швидкість зміни температури ТУГС.

Таким чином, можливо для кожної зони розрахувати три значення розузгодження вологості (для входу в зону, всередині зони, на виході зони):

$$\begin{aligned} dfi_0 &= fi_0^* - fi_0, \\ dfi_1 &= fi_1^* - fi_1, \\ dfi_2 &= fi_2^* - fi_2, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $fi_i^*$ ,  $dfi_i$  – значення бажаної й поточної вологості відповідно.

Для кожного регулятора підсумкове розузгодження можна розрахувати за наступною формулою:

$$\Delta y = a_1 \cdot dfi_0 + a_2 \cdot dfi_1 + a_3 \cdot dfi_2, \quad (5)$$

де  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – вагові коефіцієнти, які дозволяють обчислити зважене середнє розузгодження.

Вагові коефіцієнти визначаються емпіричним методом на основі модельних експериментів. Пропонуються наступні значення:  $a_1=0,5$ ,  $a_2=0,7$ ,  $a_3=1$ .

Необхідно відмітити, що для третьої зони є додатковий інформаційний параметр – температура техвуглецево-газової суміші (ТУГС), який опосередковано зв'язаний з температурою і вологістю техвуглецю на виході барабану. Похідна температури ТУГС прямо відповідає похідній температурі техвуглецю і зворотна вологості.



ПІД-регулятор третьої зони модифікуємо таким чином, щоб диференційна складова обчислювалась не на основі похідної сигналу розузгодження вологості, а на основі похідної температури ТУГС. Загальний вигляд системи керування пальниками наведений на рис. 8, 9.

Виходи ПІД-контролерів задають витрати вуглеводневого палива. Система керування пальниками забезпечує відповідну подачу палива і співвідношення паливо-повітря.

Виконується узгоджене почергове регулювання продуктивності топкових пальників починаючи з третьої умовної зони топки.

Періодично результати модельних розрахунків стану продукту уточнюються по сигналам фактичної температури вихідного техвуглецю, швидкості зміни температури техвуглецево-газової суміші.

Після виконання повного циклу регулювання для трьох умовних зон виконується циклічний повтор дій, починаючи із зчитування сигналів, що характеризують роботу технологічного потоку і розрахунку кількості випарованої рідини; якщо виникають виключні ситуації – запускаються відповідні процедури їх обробки.

Перехідні процеси регулювання вологості на окремих ділянках (рис. 10) підтверджують працездатність запропонованого способу керування.

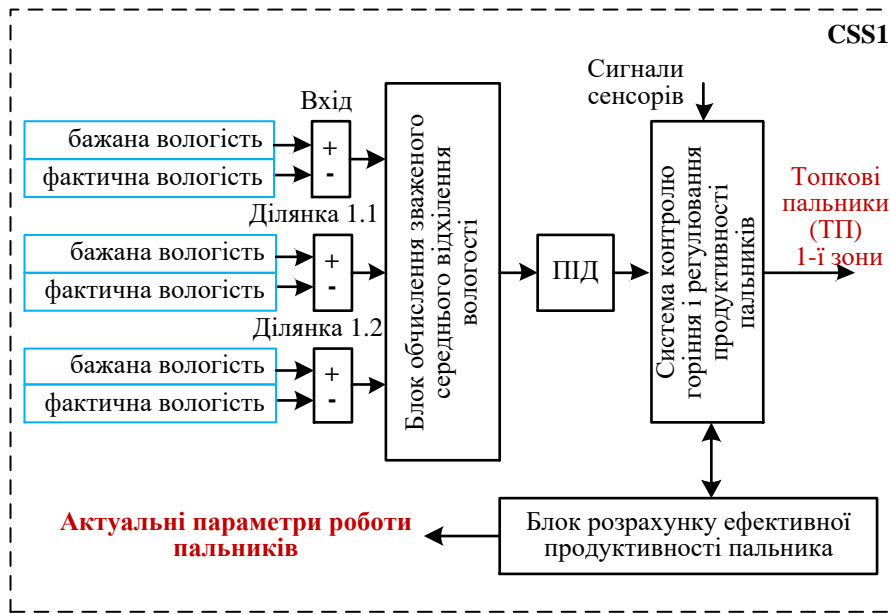


Рисунок 8 – Підсистема керування пальниками на прикладі ділянки 1 (CSS1)

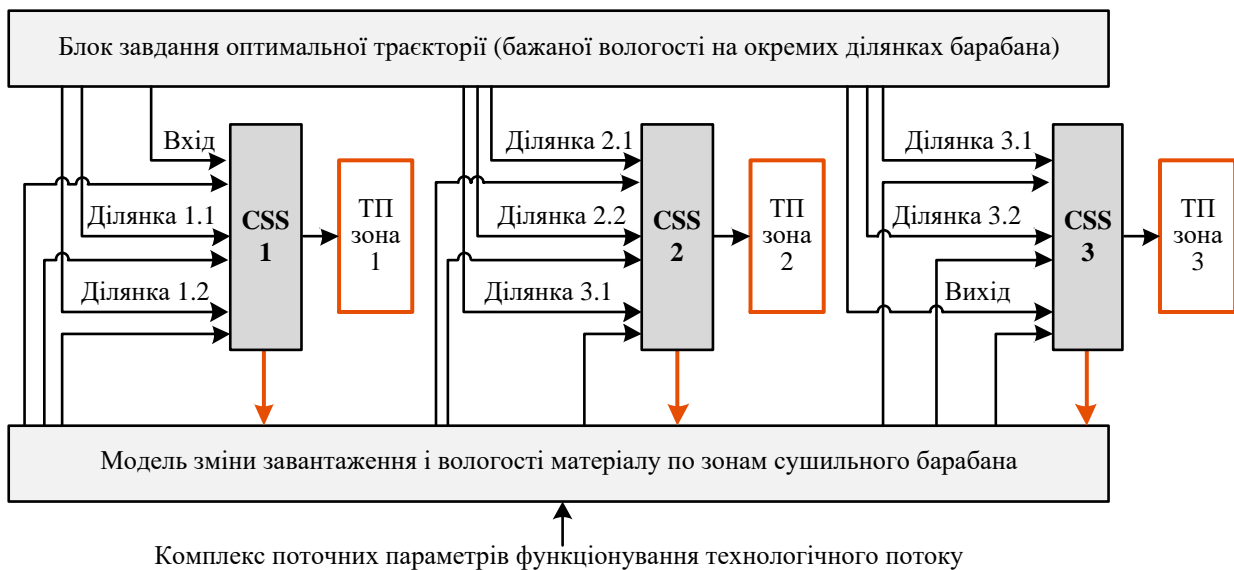


Рисунок 9 – Блок-діаграма розрахунку керуючих впливів для реалізації способу керування процесом сушіння гранульованого технічного вуглецю

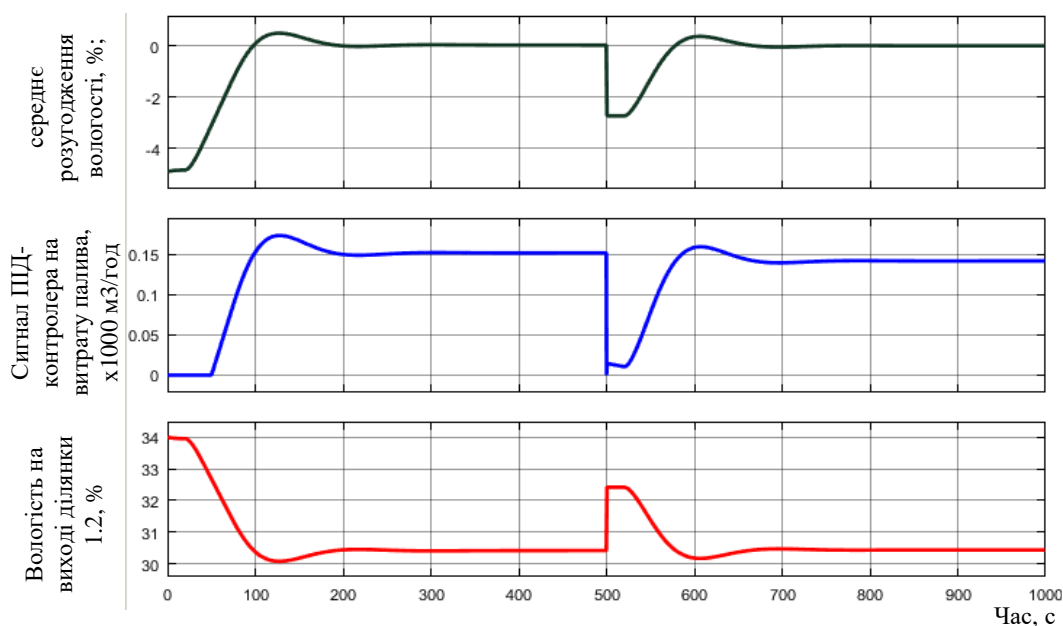


Рисунок 10 – Часова діаграма процесу стабілізації вологості техвуглецю на виході ділянки 1.2 сушильного барабану

**ВИСНОВКИ.** В результаті роботи сформульований метод керування, який відноситься до автоматизації хіміко-технологічних процесів і може бути використаний під час керування процесом сушіння гранульованого технічного вуглецю в барабанних сушильних установках з підведенням тепла від топкових газів.

Розроблений спосіб керування процесом сушіння вологого гранульованого технічного вуглецю містить стабілізацію вологості вздовж сушильного барабану ґрунтуючись на попередньому розрахунку оптимальної фазової траєкторії. Значення вологості ідентифікується спостерігачем стану на основі доступних технологічних сигналів.

При цьому використовуються зонні ПІД-контролери по умовним зонам вздовж барабану, які регулюють продуктивність топкових пальників. Керуючий вплив на пальники кожної зони розраховується на основі зваженого розузгодження по трьом контрольним точкам між бажаними значеннями вологості і поточними, які визначаються на основі розрахункової моделі процесу. Для кінцевої зони диференціальна складова ПІД-контролеру визначається шляхом обчислення похідної температури техвуглецево-газової суміші, помножену на коефіцієнт диференційної ланки. Знайдена продуктивність пальників допомагає визначити ступінь відкриття регулюючих клапанів палива і повітря.

Запропонований спосіб дозволяє здійснювати предикторне керування барабанною сушильною установкою, яка є об'єктом із суттєвим запізненням. Процес регулювання є стійким і достатньо швидким, в цілому підвищується інтегральна точність стабілізації вологості готового продукту.

В результаті досягається зниження матеріальних і енергетичних витрат на одиницю продукції у тому числі за рахунок зниження кількості некондиційного гранульованого вуглецю в процесі сушіння, зниження витрат палива, підвищення продуктивності

потоків, зниження рівня ручної праці і суб'єктивізму у формуванні режимів роботи обладнання шляхом визначення актуальних керуючих впливів на топкові пальники і стабілізації якості вихідного продукту.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Donnet J.-B., Bansal R. Ch., Wang M.-J. Carbon black: Science and Technology. New York: Marcel Dekker Inc., 2018. 416 p.
2. Берёзкин В. И. Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. СПб.: АРТЭ-ГО, 2013. 450 с.
3. Офіційний сайт ПрАТ «КЗТВ». URL <http://kztv.com.ua/> (дата звернення 05.07.2019).
4. Ивановский В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Омск, 2004. 229 с.
5. Таххан Д. Управление барабанными сушильными установками с расходящимися потоками теплоносителя: на примере сушки технического углерода: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Ярославский государственный технический университет. Ярославль, 2010. 163 с.
6. Dinçer İ., Zamfirescu C. Optimization of Drying Processes and Systems. Drying Phenomena. 2015. PP. 349-380. doi: 10.1002/9781118534892.ch9
7. Weigler F., Scaar H., Franke G., Mellmann J. Optimization of mixed flow dryers to increase energy efficiency. Drying Technology. 2016. 35(8). PP. 985-993. doi: 10.1080/07373937.2016.1230627
8. Коленчук С. В., Чернаков Н. А. Способ управления процессом сушки в барабанных сушилках. RU 2287752. Дата публикации 20.11.2006.
9. Конох И. С., Рылова Н. В. Оптимизация фазовых траекторий процесса сушки гранулированного технического углерода. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Вип. 1(108). 2018. С. 51–58.
10. Конох И. С., Самчишин М. В., Копаевич А. В. Идентификация влажности гранулированного технического углерода в сушильном барабане для оп-

тимизации управления по критерию максимальной эффективности. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Вип. 5(100). Ч. 2. 2016. С. 25–34.

11. Lutsenko I. Identification of target system operations. 1. Determination of the time of the actual comple-

tion of the target operation. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 6(2(72)). PP. 42–47.

12. Lutsenko I. Identification of target system operations. 2. Determination of the value of the complex costs of the target operation. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 1(2(73)). PP. 31–36.

## CONTROL OF THE DRYING PROCESS OF TECHNICAL CARBON USING ZONE REGULATORS

I. Konokh, V. Naida, N. Istomina, Y. Krasnopolska

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Poltava Region, Ukraine, 39600. E-mail: icegun.ik@gmail.com

**Purpose.** The work is devoted to the achievement of the optimal carbon black drying mode at point of material and energy costs. **Methodology.** The technological mode of drying was analyzed for drying drum of the Kremenchuk Carbon Black Plant. As a result of the analysis, the incoming, outgoing and affecting flows for the drying drum object are determined. The final product of the drying drum is granular carbon black with the specified quality indicators. The humidity of the processed raw material was determined as main and critical quality indicator. It is taken as the main phase variable of the technological process. The drum was divided into three zones (sections) to simplify the mathematical description. In the physical sense, each zone is tied to its furnace burner. A conditional center was chosen for each zone to improve the accuracy. This allows using three points under obtaining a section mathematical description. **Results.** The desired phase trajectory of the carbon black humidity was determined. The second-order aperiodic links for each zone were used to describe the drying process. The zone controllers are used to maintain the outlet humidity level each drying drum zone. **Originality.** To ensure the operation of the zone regulators, at the first time, the simulation model was created for carbon black portions moving along the drying drum. This simulation model is based on the developed scheme for calculating of the evaporated moisture weight in separate sections. **Practical value.** According to the technological conditions, the quality criterion is formulated. This criterion ensures the optimal change of the moisture content of the product as a time function. To ensure the quality criterion, the operation stages of the furnace burners were developed. Also the block diagram of the calculation of control actions for implementing the controlling method of the granular carbon black drying process was developed. The efficiency of the developed control method is confirmed by the obtained graphs of humidity control transient processes at certain sections.

**Key words:** wet granulation, furnace burners, zone regulator, quality criterion, normalized humidity, optimal phase trajectory.

## REFERENCES

1. Donnet, J.-B., Bansal, R. Ch., Wang, M.-J. (Ed.) (2018), *Carbon black: Science and Technology*, Marcel Dekker Inc., New York, USA.

2. Berezkin, V. I. (2013), *Uglerod: zamknutyte nanoplasty, makrostruktury, materialy* [Carbon Black: closed nanoparticles, macrostructures, materials], ARTEGO, Sankt-Peterburg, Russia.

3. Official site of PrAT “KZTV”, URL <http://kztv.com.ua/> (accessed 05.07.2019).

4. Ivanovskii, V. I. (2004), *Tekhnicheskii uglerod* [Technical Carbon], Protcessy i apparaty, Omsk, Russia.

5. Takhkhan, D. (2010), *Upravlenie barabannymi sushilnymi ustanovkami s raskhodiashchimisia potokami tep-lonositelia: na primere sushki tekhnicheskogo ugle-roda* [Control of drum drying units with divergent heat carrier flows: on the example of carbon black drying]: Candidate Thesis, specialty 05.13.06, Yaroslavl State Technical University. Yaroslavl, Russia.

6. Dinçer, İ., Zamfirescu, C. (2015), Optimization of Drying Processes and Systems Drying Phenomena, pp. 349-380. doi: 10.1002/9781118534892.ch9

7. Weigler, F., Scaar, H., Franke, G., Mellmann, J. (2016), "Optimization of mixed flow dryers to increase energy efficiency", *Drying Technology*, no. 35(8), pp. 985-993. doi: 10.1080/07373937.2016.1230627

8. Kolenchuk, S. V., Chernakov, N. A. Patent, Russia, MPK F26B25/22, *Sposob upravleniia protcessom sushki v barabannyykh sushilkakh* [Method of control of drying in drum driers], (Russia); RU no. 2287752; Declared 28.03.2008; Published 20.11.2006. Bull. no. 32.

9. Konokh, I., Rylova, N. (2018), "Optimization of the phasic trajectories of the granulated technical carbon drying process", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Iss. 1(108), pp. 51-58.

10. Konokh, I., Samchishyn, M., Kopaievych, O. (2016), "Identification of granulated carbon black moisture in a tube dryer for control optimization on the maximum efficiency criterion", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Iss. 5(100), Part 2, pp. 25-34.

11. Lutsenko, I. (2014), "Identification of target system operations. 1. Determination of the time of the actual completion of the target operation", *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, no. 6(2(72)), pp. 42-47.

12. Lutsenko, I. (2015), "Identification of target system operations. 2. Determination of the value of the complex costs of the target operation", *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, no. 1(2(73)), pp. 31–36.

Стаття надійшла 14.06.2019.