

УДК 66.012-52:662.927.4

В.І. Грицай, І.Д. Стасюк, В.В. Гуменецький*
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів,
*кафедра хімічної технології переробки нафти та газу

АВТОМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ НАГРІВАЛЬНИХ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

© Грицай В.І., Стасюк І.Д., Гуменецький В.В., 2001

Описана система автоматичного регулювання температурного режиму нагрівальної трубчастої печі, побудована на основі теплового балансу печі. Вона дозволяє оптимізувати роботу печі за критерієм зменшення динамічної похибки регулювання температури нафтопродукту на виході з печі, а також забезпечує підвищення точності стабілізації цієї температури, покращення умов роботи печі та значну економію палива.

The automatic control system of heating tube stove regime is described in given report. This system design on the base of stove heat balance. It allows to optimize a functioning a stove on the criterion of reducing dynamic control error of oil products temperature on output from the stove, as well as ensures increasing of stabilization accuracy of this temperature, improvement of conditions of functioning a stove and significant economy of fuel.

Нагрівальні трубчасті печі належить до основного технологічного обладнання, призначеного для високотемпературного нагрівання напівпродуктів на різних стадіях переробки нафти [1, 2]. Під час експлуатації трубчастих печей про теплову напруженість поверхонь нагрівання і температуру металу судять опосередковано за температурою газоподібних продуктів згоряння палива (диму) у місці їх переходу з камери радіації в камеру конвекції – за так званою температурою “перевалу” $\Theta_{\text{п}}$.

Слід відзначити, що нагрівальні трубчасті печі є енергоємними агрегатами, для яких актуальною є проблема економії енергоресурсів, а саме палива, і особливо в теперішній час для печей великої потужності. Вирішення проблеми економії енергії, яке базується на інженерному застосуванні другого закону термодинаміки для встановлення можливих меж зменшення енергетичних затрат, у багатьох випадках може забезпечити економію енергоресурсів, що перевищує 40 % [3]. Крім того, наявні резерви економічної ефективності, які можуть бути використані завдяки автоматизації технологічних процесів хімічних виробництв, зазвичай становлять від 0,5 до 6 % [4].

Завдання систем автоматичного регулювання трубчастих печей полягає у дотриманні теплового режиму, який забезпечує стабільність заданого значення температури продуктів на її виході за мінімальних затрат палива і нормальних умов роботи металу трубних змійовиків. Важливість виконання цих функцій системами автоматичного регулювання

продиктована тим, що печі є головними агрегатами у технологічному процесі переробки нафти. Важливими точками контролю роботи трубчастих печей є температури: сировини на вході та виході змійовика печі; пари води на вході та виході пароперегрівника (в багатьох випадках у конвективній секції печі монтують змійовик для перегріву пари води, яка подається в ректифікаційні колони для відпарки легкокиплячих фракцій); газоподібних продуктів згоряння палива на вході у лежак печі; труб екрана; над перевальною стінкою (особливо важливо через велику ймовірність коксоутворення на внутрішній поверхні труб і їх прогоряння).

Питанню автоматизації печей приділялося багато уваги, виконано багато досліджень і завдання автоматичного керування роботою печей в основному розв'язані [5–7]. Як правило, під час автоматичного керування роботою печей вирішуються такі основні завдання, зокрема: регулювання температури нафтопродукту на виході із печі; регулювання співвідношення витрат палива – повітря; оптимізація спалювання палива; регулювання розрідження в печі. Можна вважати, що ці всі завдання з керування піччю розв'язані, крім стабілізації остаточної температури нагрівання сировини у складних умовах роботи печі. Повний перелік систем автоматизації печі наведений у [8].

Обов'язковий обсяг систем автоматизації для нагрівальних трубчастих печей, крім систем автоматичного регулювання основних технологічних параметрів печі, які визначають ефективність її роботи, містить також і системи автоматичного технологічного контролю, сигналізації та автоматичного захисту.

Автоматичному контролю підлягають такі технологічні параметри:

- витрата продукту, який нагрівають в печі;
- температура продукту після трубчастої печі;
- тиск палива, яке надходить до пальників;
- витрата палива;
- температура стінок трубчастих змійовиків;
- температура газоподібних продуктів згоряння палива, які викидають в атмосферу;
- концентрація кисню в газоподібних продуктах згоряння палива;
- розрідження в печі.

Сигналізації підлягають такі параметри у випадку відхилення їх значень за допустимі межі, а саме:

- зниження витрати продукту перед трубчастою піччю;
- підвищення температури продукту на виході з печі;
- зменшення тиску палива, яке надходить до пальників;
- підвищення температури стінок трубчастих змійовиків;
- підвищення вмісту кисню в газоподібних продуктах згоряння палива;
- падіння розрідження перед димосмоком (у печі).

Автоматичний захист здійснюється перекриттям подавання палива в піч у таких випадках:

- падіння витрати продукту в трубчасту піч;

- досягнення максимальної температури продукту після печі;
- припинення горіння в печі;
- зупинення димосмоків;
- падіння розрідження в печі.

Залежно від функціонального призначення нагрівальної трубчастої печі (для процесу риформінгу, для нагрівання продукту тощо) вона може бути додатково оснащена й іншими системами автоматизації.

Нагрівальна піч є складним технологічним агрегатом, в якому виділяють декілька окремих об'єктів регулювання. Відмінною особливістю печі є наявність двобічно опроміненних екранів. Крім того, багатопотокові печі умовно розділені на декілька радіантних секцій, що переходять в ізольовані конвективні камери. У цих секціях між кожною парою змійовиків розміщені газомазутні пальники. Відсутність теплоізоляції між сусідніми секціями створює можливість конвективного і променевого теплообміну між ними, що не дає змогу використовувати в системі автоматичного регулювання для компенсації збурень у топці печі малоінерційні сигнали по температурі газів, що відводяться з кожної секції радіаційної частини печі в її конвективну частину (температури “перевалів”).

Для трубчастих печей інших конструкцій в системі автоматичного регулювання їх температурного режиму застосовують традиційний контур стабілізації температури перевалу.

На вихідну температуру сировини, що нагрівається у трубчастому змійовику, крім збурень з боку потоків газоподібних продуктів згоряння палива, впливають: коливання витрати і теплоти згоряння палива, розрідження в секції, витрати і температури повітря, що подається до пальників, а також зміни витрати і складу сировини через змійовик, наявність забруднень на зовнішній і внутрішній поверхнях змійовиків.

Зазвичай система автоматичного керування роботою багатопотокової печі складається з регулятора температури нафти на виході з печі, який діє на подачу газу в піч, і регуляторів витрати кожного потоку нафти у піч. За допомогою регуляторів витрати добиваються такого розподілу потоків по секціях змійовика, щоб температура нафти після кожної з секцій була як можна ближчою до середньої температури. Практично цього добитися важко, оскільки тепловіддача секцій різна, і тому витрата продукту через них повинна відрізнятись. Така система не вирішує завдання автоматичного перерозподілу потоків по секціях змійовика з метою зведення температур на виході усіх секцій до однакового значення.

Розглянемо структурні схеми, тобто схеми зв'язку між технологічними параметрами, що характеризують роботу радіаційної і конвективної частин однопотокової печі як об'єктів регулювання, які зображені, відповідно, для радіаційної частини на рис. 1 і для конвективної частини на рис. 2.

Як видно з рис. 1, кінцева температура продукту Θ_{WK} на виході з печі залежить від багатьох параметрів і факторів

$$\Theta_{WK} = f(F_B, F_W, F_A, F_V, \Theta_{WP}, \Theta_B, \Theta_A, P_B, \alpha_{1P}, \alpha_{2P}, \lambda_P, \epsilon, \dots), \quad (1)$$

де F_B – витрата палива в піч; F_W – витрата продукту, який нагрівається в печі; F_A – витрата повітря для горіння палива; F_V – витрата газоподібних продуктів згоряння палива; Θ_{WP} –

температура продукту на виході із конвективної камери, який надходить у радіаційну частину печі; Θ_B – температура палива, яке подається в піч; Θ_A – температура повітря перед пальниками печі; P_B – тиск палива на вході в піч; α_{1P} – коефіцієнт тепловіддачі від продуктів спалювання палива до зовнішньої поверхні стінки трубчастих змійовиків у радіаційній частині печі; α_{2P} – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінки трубчастого змійовика до продукту в радіаційній частині печі; λ_P – коефіцієнт теплопровідності стінки трубчастого змійовика в радіаційній частині печі та ε – коефіцієнт чорноти стінки трубчастого змійовика.

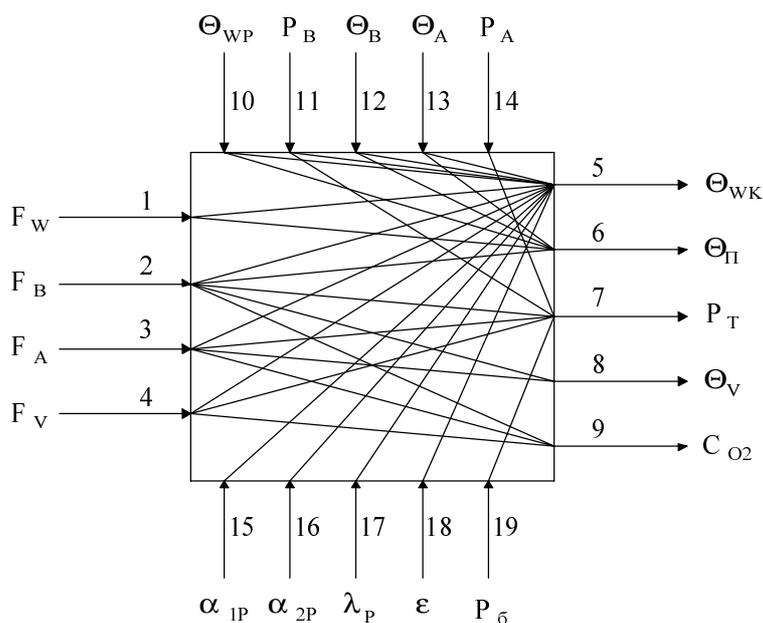


Рис. 1. Структурна схема радіаційної камери нагрівальної трубчастої печі

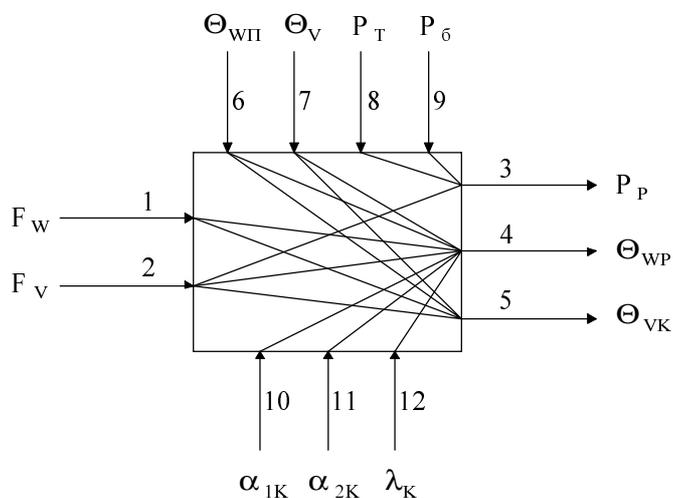


Рис. 2. Структурна схема конвекційної камери нагрівальної трубчастої печі

У кожному конкретному випадку динамічна похибка системи регулювання температури продукту на виході з печі залежатиме від вказаних величин

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_{\text{WK}} = & \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial F_{\text{B}}} \cdot \Delta F_{\text{B}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial F_{\text{W}}} \cdot \Delta F_{\text{W}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial F_{\text{A}}} \cdot \Delta F_{\text{A}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial F_{\text{V}}} \cdot \Delta F_{\text{V}} + \\ & + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \Theta_{\text{WP}}} \cdot \Delta\Theta_{\text{WP}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \Theta_{\text{B}}} \cdot \Delta\Theta_{\text{B}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \Theta_{\text{A}}} \cdot \Delta\Theta_{\text{A}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial P_{\text{B}}} \cdot \Delta P_{\text{B}} + \\ & + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \alpha_{1\text{P}}} \cdot \Delta\alpha_{1\text{P}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \alpha_{2\text{P}}} \cdot \Delta\alpha_{2\text{P}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \lambda_{\text{P}}} \cdot \Delta\lambda_{\text{P}} + \frac{\partial\Theta_{\text{WK}}}{\partial \epsilon} \cdot \Delta\epsilon + \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\partial\Theta_{\text{WK}} / \partial F_{\text{B}}$ – коефіцієнт впливу зміни витрати палива на температуру продукту на виході з печі, який визначається як часткова похідна функції за виразом (1) по витраті палива; ΔF_{B} – зміна витрати палива від номінального значення; інші позначення у виразі (2) стосуються коефіцієнтів впливу на температуру продукту на виході з печі та відхилень від номінальних значень відповідно величин F_{W} , F_{A} , F_{V} , Θ_{WP} , Θ_{B} , Θ_{A} , P_{B} , $\alpha_{1\text{P}}$, $\alpha_{2\text{P}}$, λ_{P} та ϵ .

Функція передачі для каналу “температура продукту на виході з печі – збурення на об’єкт регулювання” з врахуванням функцій передачі по всіх окремих каналах впливаючих величин буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} W_{\Theta_{\text{WK}}}(p) = & W_{1,5}(p) + W_{2,5}(p) + W_{3,5}(p) + W_{4,5}(p) + W_{10,5}(p) + W_{11,5}(p) + \\ & + W_{12,5}(p) + W_{13,5}(p) + W_{15,5}(p) + W_{16,5}(p) + W_{17,5}(p) + W_{18,5}(p) + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

До збурень, які найбільше впливають на системи регулювання, належать витрати F_{W} , F_{B} і F_{A} ; температури Θ_{WP} , Θ_{B} і Θ_{A} ; тиски P_{B} і P_{A} . У більшості випадків P_{B} і $P_{\text{A}} = \text{const}$. У випадку зміни режиму роботи трубопроводів і значних змін температур змінюються значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{1\text{P}}$ і $\alpha_{2\text{P}}$. Під час значних забруднень стінок змінюється значення коефіцієнта ϵ .

Синтез оптимальної схеми системи автоматичного керування нагрівальної трубчастої печі вимагає детального аналізу всіх складових похибки $\Delta\Theta_{\text{WK}}$ і функції передачі $W_{\Theta_{\text{WK}}}$. Можна вважати, що під час дуже складних умов роботи печі, коли F_{W} і $\Theta_{\text{WP}} = \text{var}$, а також Θ_{B} і $\Theta_{\text{A}} = \text{var}$, то сучасні схеми регулювання температурного режиму печі не забезпечать задовільних результатів, оскільки піч є інерційним об’єктом зі значним запізненням і значною нелінійністю, бо значення коефіцієнтів $\alpha_{1\text{P}}$ і $\alpha_{2\text{P}}$ змінюються в широких межах.

Для конвективної частини печі, структурна схема якої зображена на рис. 2, залежність між температурою і впливаючими величинами можна записати у формі

$$\Theta_{\text{WP}} = f(F_{\text{W}}, F_{\text{V}}, \Theta_{\text{WP}}, \Theta_{\text{V}}, \alpha_{1\text{K}}, \alpha_{2\text{K}}, \lambda_{\text{K}}, \dots), \quad (4)$$

де Θ_{WP} – початкова температура продукту на вході в конвективну камеру печі; Θ_{V} – температура газоподібних продуктів згоряння палива; $\alpha_{1\text{K}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від продуктів спалювання палива до зовнішньої поверхні стінки трубчастих змійовиків у конвективній камері печі; $\alpha_{2\text{K}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінки трубчастого змійовика до продукту в конвективній камері печі; λ_{K} – коефіцієнт теплопровідності стінки трубчастого змійовика в конвективній камері печі.

Відповідно для динамічної похибки регулювання в конвективній камері печі запишемо вираз

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_{WP} = & \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial F_W} \cdot \Delta F_W + \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial F_V} \cdot \Delta F_V + \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial\Theta_{W\Pi}} \cdot \Delta\Theta_{W\Pi} + \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial\Theta_V} \cdot \Delta\Theta_V + \\ & + \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial\alpha_{1K}} \cdot \Delta\alpha_{1K} + \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial\alpha_{2K}} \cdot \Delta\alpha_{2K} + \frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial\lambda_K} \cdot \Delta\lambda_K + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\frac{\partial\Theta_{WP}}{\partial F_W}$ – коефіцієнт впливу зміни витрати продукту на його температуру на виході з конвективної камери печі, який дорівнює частковій похідній функції за виразом (4) по витраті продукту; ΔF_W – зміна витрати продукту від номінального значення; інші позначення у виразі (5) стосуються коефіцієнтів впливу на температуру продукту на виході з конвективної камери печі та відхилень від номінальних значень відповідно величин F_W , F_V , $\Theta_{W\Pi}$, Θ_V , α_{1K} , α_{2K} та λ_K .

Функція передачі для конвективної частини печі з врахуванням функцій передачі по всіх окремих каналах величин, які впливають, буде мати вигляд:

$$W_{\Theta_{WP}}(p) = W_{1,4}(p) + W_{2,4}(p) + W_{6,4}(p) + W_{7,4}(p) + W_{10,4}(p) + W_{11,4}(p) + W_{12,4}(p) + \dots \quad (6)$$

Для конвективної частини печі збуреннями, які мають найбільший вплив на температуру продукту на виході печі, можуть бути витрати F_W і F_V ; температури $\Theta_{W\Pi}$ і Θ_V . Коефіцієнти тепловіддачі α_{1K} і α_{2K} здебільшого визначаються режимом роботи трубопроводів.

Конвективна камера є об'єктом з розподіленими параметрами з великою інерційністю, викликаною великою масою металу і продукту в трубах, а також має значне запізнення. Традиційні схеми регулювання температурного режиму печі здебільшого побудовані на принципі регулювання за відхиленням (принципі Рамеллі), який для таких складних об'єктів регулювання призводить до значних динамічних похибок регулювання.

У цій роботі авторами пропонується зображена на рис. 3 схема системи автоматичного регулювання, яка побудована на основі теплового балансу печі, що дає можливість врахувати основні збурення в печі ще до зміни температури Θ_{WK} . На цій схемі позначено: 1 – регулятор температури продукту на виході з печі; 2 – регулятор температури перевалу; 3 – регулятор розрідження в печі; 4 – регулятор співвідношення теплових потоків, що вводяться в піч і відводяться з неї; 5 – регулятор співвідношення витрат паливо – повітря; 6 – регулятор концентрації кисню в газоподібних продуктах згоряння палива; 7 і 8 – давачі витрати відповідно палива і повітря до пальників; 9 – давач витрати продукту, який нагрівають в печі; 10 і 11 – давачі температури продукту, відповідно, холодного (на вході в піч) і нагрітого (на виході з неї); 12 – обчислювач різниці температур; 13 і 14 – обчислювачі теплових потоків відповідно, що вводиться в піч через згоряння палива і що відводиться з продуктом, який нагрівають в печі; 15 – давач температури палива, яке надходить до пальників.

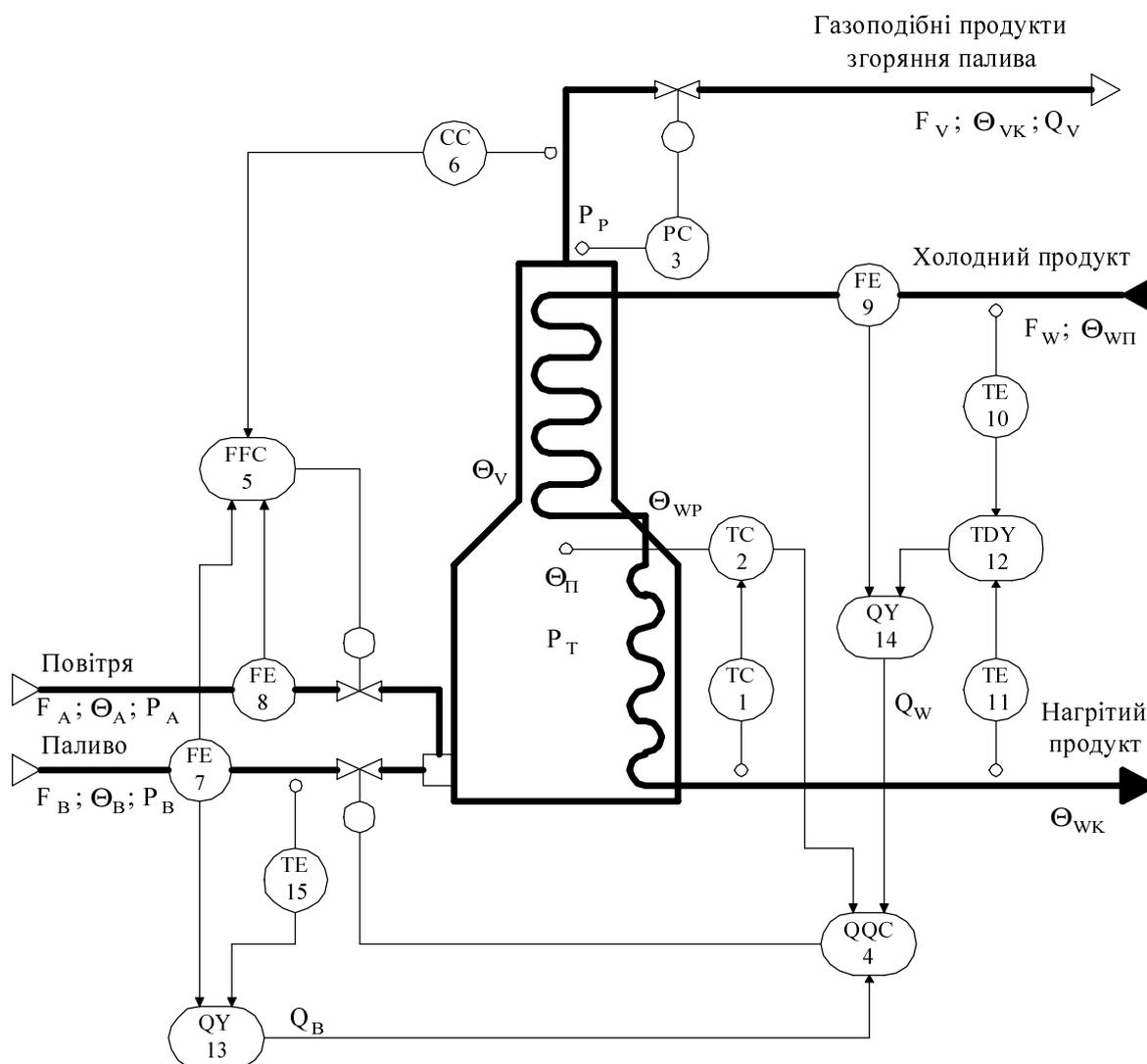


Рис. 3. Спрощена функціональна схема автоматизації нагрівальної трубчастої печі

Регулювання температурного режиму в печі реалізує регулятор співвідношення теплових потоків, що вводяться в печ (у результаті спалювання палива) $Q_{\text{В}}$ і відводяться з неї (з нагрітим продуктом) $Q_{\text{В}}$. У випадку зміни теплоти згоряння палива або значної зміни питомої теплоємності продукту динамічна похибка стабілізації $\Theta_{\text{ВК}}$ дещо збільшується. Для коректування співвідношення теплових потоків $Q_{\text{В}}/Q_{\text{В}}$ вибрано двоконтурну схему з головним регулятором температури $\Theta_{\text{ВК}}$ і допоміжним регулятором температури перевалу печі $\Theta_{\text{П}}$.

Радіаційна частина печі (топка) є малоінерційним об'єктом регулювання, тому, насамперед, змінюється температура перевалу $\Theta_{\text{П}}$, а потім змінюється температура продукту на виході з печі $\Theta_{\text{ВК}}$. Температура $\Theta_{\text{П}}$ виступає індикатором теплового балансу радіаційної частини печі, тому зміна $\Theta_{\text{П}}$ вказує на зміну теплового балансу. Відновлення $\Theta_{\text{П}}$ призводить до відновлення необхідного теплового балансу. У випадку незмінних параметрів печі температура $\Theta_{\text{П}}$ однозначно визначає значення температури $\Theta_{\text{ВК}}$. Під час зміни навантаження печі ця однозначність порушується, тому значення температури $\Theta_{\text{П}}$ необхідно коректувати. Цю корекцію виконує регулятор температури $\Theta_{\text{ВК}}$.

Складніші умови роботи печі вимагають створення і впровадження складніших алгоритмів керування.

Розглянута в цій роботі схема системи автоматичного керування нагрівальною трубчастою піччю дає змогу оптимізувати її температурний режим за критерієм зменшення динамічної похибки регулювання температури продукту на виході з печі. Впровадження запропонованої авторами схеми системи автоматичного керування нагрівальною трубчастою піччю на нафтопереробних виробництвах може забезпечити підвищення точності стабілізації температури продукту на виході з печі, покращання умов роботи печі та значну економію палива.

1. Ентус Н.Р., Шарихин В.В. *Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.* – М., 1987. – 304 с. 2. Рабинович Г.Г. и др. *Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник.* – М., 1979. – 568 с. 3. Шински Ф.Г. *Управление процессами по критерию экономии энергии.* – М., 1981. – 388 с. 4. Дудников Е.Г. и др. *Автоматическое управление в химической промышленности: Учеб. для вузов.* – М., 1987. – 368 с. 5. Дианов В.Г. *Автоматизация производственных процессов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.* – М., 1968. – 328 с. 6. Голубятников В.А., Шувалов В.В. *Автоматизация производственных процессов в химической промышленности.* – М., 1972. – 248 с. 7. Шувалов В.В., Огаджанов Г.А., Голубятников В.А. *Автоматизация производственных процессов в химической промышленности.* – М., 1991. – 480 с. 8. Стенцель Й.І. *Автоматизация технологических процессов химических производств: Навч. посібник.* – К., 1995. – 360 с.

УДК 547.915:392

Д.І. Проц, В.І. Федорчук-Мороз

Волинський державний університет імені Лесі Українки,
кафедра органічної та біологічної хімії

ВИЗНАЧЕННЯ ЖИРНИХ КИСЛОТ У ЛІПІДНІЙ ФРАКЦІЇ РОСЛИН РОДИНИ АМАРАНТОВІ (*Amaranthaceae*)

© Проц Д.І., Федорчук-Мороз В.І., 2001

Методом газорідинної хроматографії розділені метилові ефіри жирних кислот від C₈ до C₂₄ ліпідної фракції амарантів: *Amaranthus cruentus*, *Amaranthus caudatus* і *Amaranthus retroflexus* L.

The separation of methyl esters of fatty acids from C₈ to C₂₄ of lipids fraction of amaranths (*Amaranthus cruentus*, *Amaranthus caudatus* и *Amaranthus retroflexus* L.) have been carried out by the method of gas-liquid chromatographic analysis.

Останнім часом активно проводяться дослідження рослин української флори, що застосовуються у народній медицині, з метою обґрунтування їх фармакологічних властивостей та раціонального використання цінної лікарської сировини.