

Л.К. ЖУЧЕНКО

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Процес випалювання є одним із основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів. Оскільки цей процес характеризується значними енерговитратами, виникає актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів, яка полягає в зменшенні енергоспоживання.

Аналіз наявних систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів дав змогу виявити недоліки останніх і сформулювати завдання дослідження, спрямоване на розроблення нової системи програмного керування цим процесом з метою підвищення його ресурсо- і енергозбереження.

У статті запропонована система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка, на відміну від наявних систем, де температурний графік процесу задається «вручну» на основі досвіду оператора-технолога, дає змогу розраховувати й реалізовувати оптимальний температурний графік згідно з вибраним критерієм оптимальності.

Метою дослідження системи керування було проаналізувати динаміку зміни температур у характерних точках заготовок, що випалюються, а також вплив тривалості процесу випалювання й налаштувань ЛК-регулятора на перепад температур у заготовці, де цей перепад максимальний.

Проведено дослідження впливу параметрів налаштування ЛК-регулятора системи програмного керування на динаміку температур у характерних точках заготовок і на витрати палива в процесі випалювання. Представлена система програмного керування передбачає розрахунок керування до початку технологічного процесу випалювання й реалізацію розрахованої програми без зворотного зв'язку. Тим самим відсутня можливість урахування збурень різної природи, які впливають на технологічний процес. У зв'язку з цим показана доцільність побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу.

Ключові слова: вуглецеві вироби, програмне керування, система керування, ЛК-регулятор.

L.K. ZHUCHENKO

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Polytechnic Institute"

PROGRAM CONTROL SYSTEM OF THE PROCESS OF CARBON PRODUCTS BURNING

The burning process is one of the main technological processes in the production of carbon products. Since this process is characterized by significant energy consumption, there is an urgent scientific and technical task of increasing the efficiency of the process of burning carbon products, which consists in reducing energy consumption.

The analysis of the existing control systems for the process of burning carbon products made it possible to identify the shortcomings of the latter and to formulate a research task aimed at developing a new program control system for this process in order to increase its resource and energy saving

The article proposes a program control system for the process of burning carbon products, which gives preference to existing systems where the temperature schedule is set "manually" based on the experience of the operator-technologist, which allows to calculate and implement the optimal temperature schedule in accordance with the selected criterion of optimality.

The purpose of the research of the control system was to analyze the dynamics of temperature changes at the characteristic points of the fired blanks, as well as the influence of the duration of the firing process and the settings of the LC-regulator on the temperature difference in the billet, where this difference is maximum.

A study of the influence of the setting parameters of the LC regulator of the program control system on the temperature dynamics at the characteristic points of the workpieces and on the fuel consumption during the burning process. The control system is presented, the calculation of control before the start of the technological process of burning and implementation of the calculated program without feedback. Thus, there is no possibility of taking into account drilling of various nature, which affect the technological process. In this regard, the expediency of building a real-time control system for the process of burning carbon products is shown.

Key words: carbon products, program control, control system, LC-regulator.

Постановка проблеми

Аналіз сьогоденної практичної реалізації процесу випалювання вуглецевих виробів свідчить про те, що цей процес є фактично некерованим [1–3]. Після розміщення пальника на черговій камері (після чого камера стає «камерою під вогнем») процес випалювання триває певний час за максимальної витрати палива. Тривалість цього процесу задається оператором-технологом на основі власного досвіду і статистичних даних, накопичених на попередніх кампаніях випалювання. Такий підхід забезпечує максимальну продуктивність печі випалювання щодо виробів, що обробляються.

При цьому, як свідчить практика, об'єктивні помилки в технологічній реалізації перебігу процесу та його тривалості призводять, з одного боку, до перевитрат енергоносіїв, а з іншого – до значної кількості браку кінцевої продукції.

Найвні системи керування процесом випалювання, короткий аналіз яких наведена вище, розглядають питання якості продукції та енергозбереження окремо одне від одного, без комплексного підходу до їх розв'язання в рамках оптимальної системи керування.

Створенню будь-якої оптимальної системи керування, у тому числі системи оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів, передує етап формулювання завдання оптимального керування, яке в цьому разі має передбачати комплексне вирішення питань енергозбереження процесу випалювання й забезпечення потрібної якості вуглецевої продукції.

Добре відомо [4–7; 8], що всі техніко-економічні показники процесу випалювання вуглецевих виробів пов'язані з температурним режимом його реалізації. Тому надалі для реалізації оптимального керування процесом випалювання підлягають визначенню температурний графік і тривалість цього процесу.

Коли говоримо про температурний графік, треба визначити, про яку температуру й у якій точці печі йде мова. З огляду на значну розподіленість температурного поля печі випалювання [7; 8; 9; 10–12], у різних точках печі температури та графіки їх зміни будуть суттєво відрізнятися.

За результатами попередніх досліджень [7; 9; 10–12] видається доцільним, по-перше, під час вибору тривалості процесу випалювання орієнтуватися на нижню точку заготовки в «холодній зоні», де температура найменша. По-друге, для запобігання браку вуглецевих виробів потрібно контролювати заготовку, у якій перепад температур максимальний.

Передусім потрібно з'ясувати, як саме можуть бути сформовані температурний графік і тривалість процесу випалювання. Сьогодні ці визначальні технологічні показники задає оператор-технолог. Але такий підхід, безумовно, є суб'єктивним і його результативність залежить від кваліфікації оператора-технолога.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На жаль, сьогодні питанню створення й упровадження системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів приділено недостатньо уваги. Відомі роботи присвячені в основному питанням або контролю за температурним режимом печі випалювання, або організації самого процесу випалювання.

Так, у дослідженні [5] описана робота двох дифузійних пальників, що встановлені в склепінні камери, при тиску газу 3000 Па, що давало змогу вести процес випалювання за заданим графіком з точністю $-50 \dots + 30$ °С. Контроль процесу зводився до вимірювання температури під склепінням камери й запису показів на вторинному приладі (самописці). Очевидно, що, крім низької точності дотримання графіка випалювання заготовок, такий спосіб керування призводив до невиправдано високої перевитрати палива і значного браку через досить великий перепад температури по висоті камери.

У зв'язку з практичною неможливістю регулювання співвідношення повітря/газ через особливість конструкції печі, а саме підсосу повітря на контакт склепіння з камерою печі,

у роботах [5–7] наведено теоретичне обґрунтування доцільності використання системи імпульсного спалювання палива для багатокамерних печей випалювання, що призводить, на думку авторів, до зменшення перевитрати палива. У праці [8] подається обґрунтування доцільності створення системи керування процесом випалювання вуглеграфітових заготовок із використанням системи імпульсного спалювання палива.

З досліджень останніх років варто виділити роботи [6; 8; 9]. У них обґрунтовано доцільність синтезу системи керування на базі штучних нейронних мереж для вирішення завдання визначення ймовірності дефектів у заготовках. Розв’язане завдання обмеженості необхідних для навчання нейронної мережі даних шляхом застосування особливої структури – автоенкодера. Порівняно із системою керування з класичним ПД-регулятором розроблена система забезпечує меншу витрату палива для досягнення продукції необхідної якості. Запропонований регулятор забезпечує менші перепади та прирости температур протягом усього процесу випалювання.

Мета дослідження

Мета дослідження системи керування – проаналізувати динаміку зміни температур у характерних точках заготовок, що випалюються, а також вплив тривалості процесу випалювання й налаштувань ЛК-регулятора на перепад температур у заготовці, де цей перепад максимальний.

Виклад основного матеріалу дослідження

Система програмного керування

Наразі пропонується інший підхід, виходячи з рекомендацій щодо швидкості підвищення температури, наданих у працях [6; 7]. Знаючи початкову температуру і приймаючи певний закон зміни температури в процесі випалювання (лінійний, кусково-лінійний, лінійний із насиченням тощо) можна сформувати шуканий температурний графік. При цьому тривалість процесу випалювання має бути задана.

У такій постановці задача оптимального керування процесом випалювання являє собою задачу лінійно-квадратичного керування з відомим критерієм оптимальності [13]:

$$I = \int_0^{T_k} [q(T(\tau) - T_{зад}(\tau))^2 + ru^2(\tau)] d\tau \quad (1)$$

або у дискретному вигляді

$$J = \sum_{k=0}^N [q(T(k) - T_{зад}(k))^2 + ru^2(k)], \quad (2)$$

де T_k – тривалість процесу випалювання, $T(\tau)$, $T(k)$ – температура в контрольній точці в момент часу $0 \leq \tau \leq T_k$ і дискретний момент часу k відповідно; $T_{зад}(\tau)$, $T_{зад}(k)$ – задана температура в контрольній точці в момент часу τ та в дискретний момент k відповідно; q , r – параметри налаштування ЛК-регулятора; $T_k = N\Delta\tau$ ($\Delta\tau$ – крок дискретизації).

За наявності математичної моделі процесу випалювання, наприклад [6; 7], оптимальний закон керування u_{opt} може бути розрахований на початку термічної обробки заготовок у «камері під вогнем», використовуючи стандарте програмне забезпечення [14], і керування процесом випалювання може бути реалізоване у вигляді програмного керування.

Результати проведеного дослідження подано на рисунках 1–4.

Точки 1 і 2 – відповідно верхня й нижня точки заготовки, яка розташована в «гарячій зоні» з найвищими температурами. Саме різниця температур у цих точках формує максимальний перепад, який є предметом цього дослідження. Точка 3 – нижня точка заготовки в «холодній зоні», де температура найменша. Температура в цій точці визначає тривалість процесу випалювання. Процес випалювання вважався завершеним, коли температура в точці 3 досягала 1300 °С.

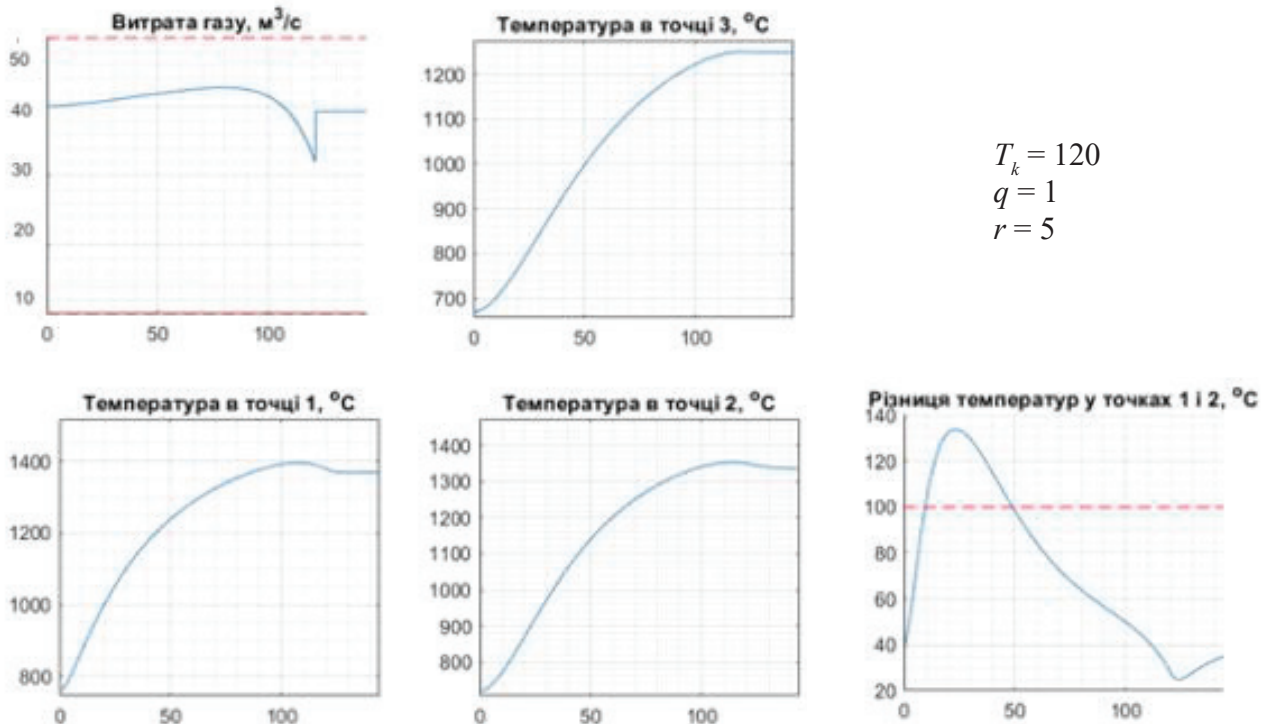


Рис. 1

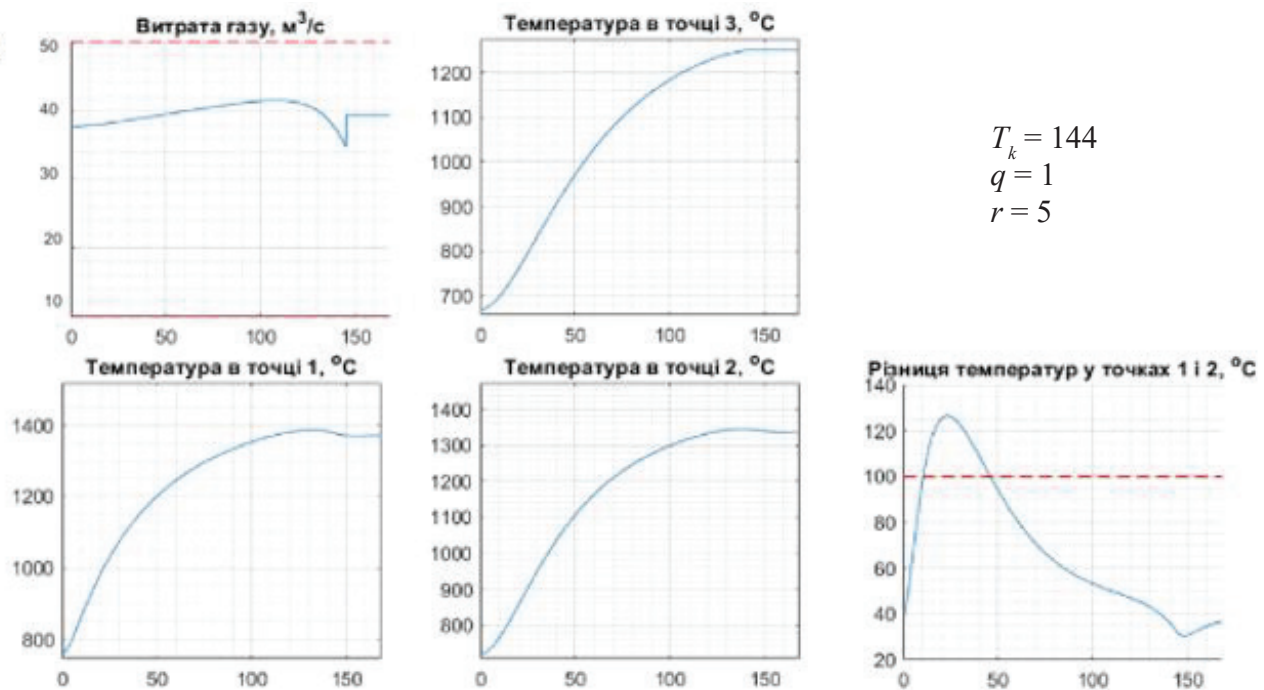
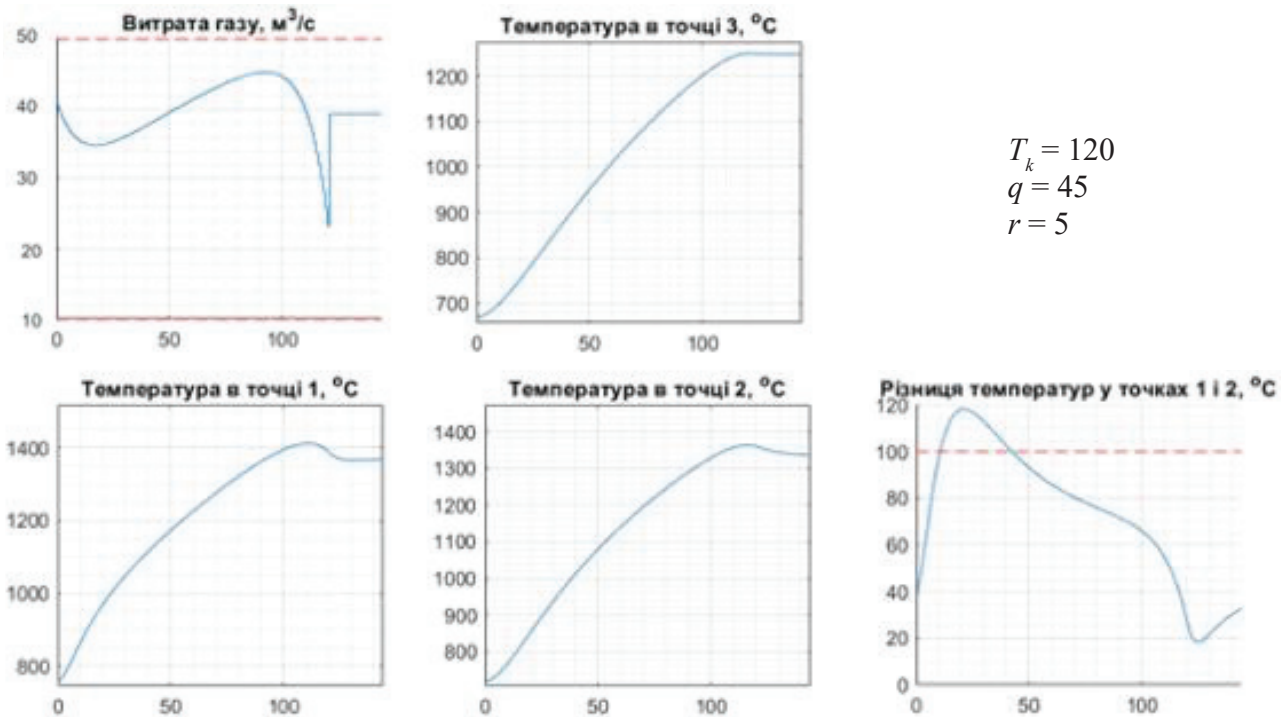


Рис. 2

Як свідчать наведені результати, характер динаміки температур у всіх точках, що розглядаються, практично не залежить ні від тривалості процесу випалювання, ні від параметрів налаштування ЛК-регулятора. Водночас збільшення тривалості випалювання (рис. 1, 2) призводить до зменшення максимального перепаду температур у найбільш «небезпечній» заготовці, що є, безумовно, позитивним моментом. Однак треба пам'ятати про те, що в цьому випадку зменшується загальна продуктивність виробництва загалом.

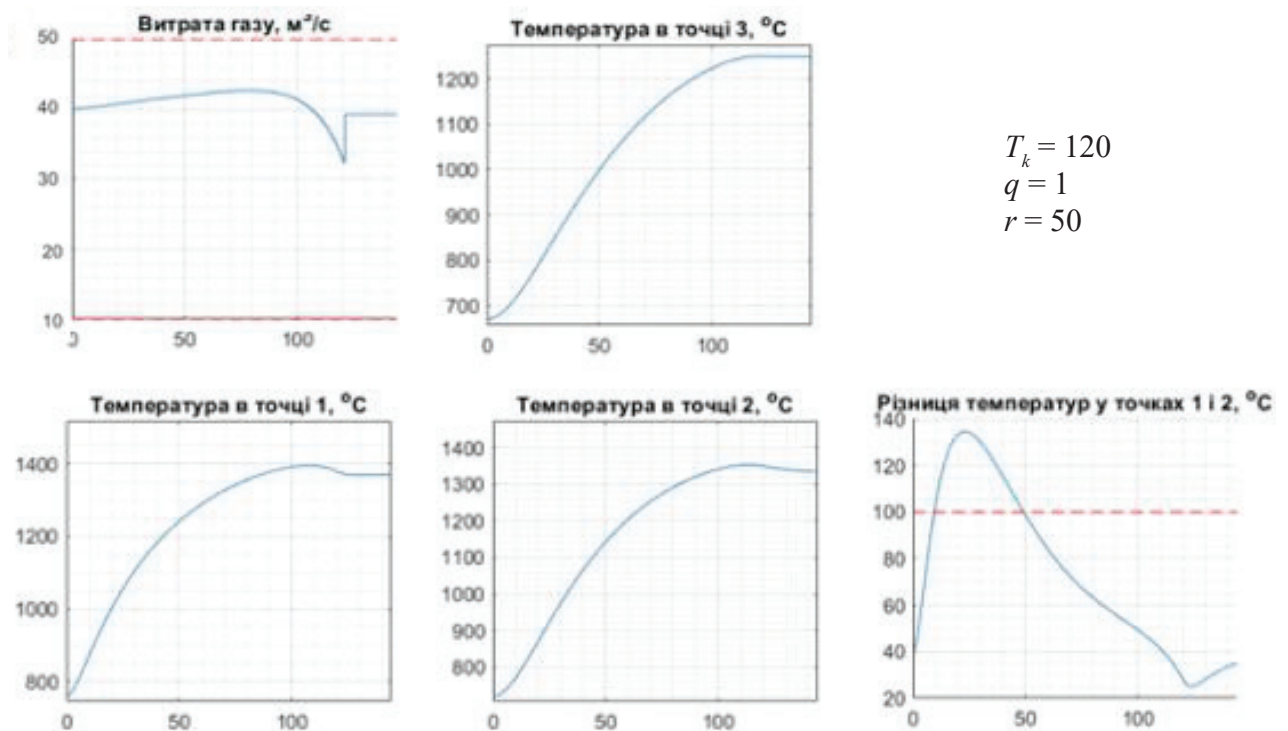


$$T_k = 120$$

$$q = 45$$

$$r = 5$$

Рис. 3



$$T_k = 120$$

$$q = 1$$

$$r = 50$$

Рис. 4

Суттєвий вплив на максимальний перепад температур має налаштування параметра q регулятора (рис. 1, 3). Збільшення його величини зменшує максимальний перепад, що в принципі є очікуваним результатом.

Зміна параметра r фактично не впливає на динаміку максимального перепаду температур у заготовці, зате дає змогу витратити менше палива (рис. 4).

Наведена вище система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів має свої недоліки. Одним із них є те, що тривалість процесу випалювання задається суб'єктивно, що може призвести до погіршення техніко-економічних показників процесу та якості вуглецевих виробів.

Варто зазначити, що елемент «суб'єктивності» у визначенні тривалості процесу випалювання можна усунути, використавши зміну ентропії вуглецевих виробів як критерій тривалості процесу [15]. За такого підходу розрахувати потрібну тривалість можна за допомогою такого ітераційного алгоритму: 1) задати початкову тривалість T_k , яка наперед менша за потрібну ($T_k < 100$ год.); 2) розв'язати задачу (1) або (2); 3) розрахувати значення температури в контрольній точці наприкінці кампанії процесу випалювання; 4) розрахувати відповідне значення ентропії E_k ; 5) знайти різницю ентропії наприкінці процесу випалювання E_k та на попередньому кроці E_{k-1} ; 6) якщо $\Delta E = E_k - E_{k-1} \leq 0$, то T_k – потрібна тривалість процесу випалювання; 7) якщо $\Delta E > 0$, то $T_k = T_k + \delta t$ (δt – крок дискретизації) – $E_{k-1} = E_k$ та перейти до п. 2.

Висновки

Запропонована система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів, на відміну від наявних систем, де температурний графік процесу задається «вручну» на основі досвіду оператора-технолога, дає змогу розраховувати й реалізовувати оптимальний температурний графік згідно з вибраним критерієм оптимальності.

Збільшення тривалості процесу випалювання призводить до зменшення максимального перепаду температур у заготовках, що сприяє запобіганню браку готової продукції. Однак треба враховувати, що це збільшення може призвести до зменшення продуктивності виробництва загалом.

Проведено дослідження впливу параметрів налаштування ЛК-регулятора на динаміку температур у характерних точках заготовок і на витрати палива в процесі випалювання.

Представлена система програмного керування передбачає розрахунок керування до початку технологічного процесу випалювання й реалізацію розрахованої програми без зворотного зв'язку. Тим самим відсутня можливість урахування збурень різної природи, які впливають на технологічний процес. Ще більше складностей виникає в разі відключення електроживлення, що сьогодні в період дії воєнного стану не є чимось незвичним.

Розв'язати це завдання можна побудовою системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу, що й має бути предметом подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Жученко Л.К. Методологічні засади дослідження підвищення ефективності технологічних процесів (термічна обробка вуглецевих матеріалів). *Філософія та науково-технічна творчість у хронотоні технічного університету* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2020. С. 147–150.
2. Жученко Л.К., Волощук В.А. Постановка задачі оптимізації виробництва вуглеграфітової продукції на етапі випалювання. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики* : матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів. Київ, 2020. С. 4.
3. Жученко Л.К. Постановка задачі оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. № 5. С. 81–85.
4. Коротинський А.П., Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник*. 2017. № 102. С. 174–179.
5. Supervisory control system for monitoring a pharmaceutical hot melt extrusion process / D. Markl et al. *AAPS PharmSciTech*. 2013. № 14. P. 1034–1044. DOI: 10.1208/s12249-013-9992-7

6. Підвищення ефективності випалювання вуглеграфітових заготовок. Є.М. Панов та ін. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2011. № 1. С. 25–30.
7. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів : дис. ... докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2020. 190 с.
8. Пулинець І.В. Теплообмін в багатокамерних печах вуглеграфітових виробів : монографія / Мін-во освіти і науки України. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 175 с.
9. Коротинський А.П., Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник*. 2017. № 102. С. 174–179.
10. Коротинський А.П., Жученко О.А. Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем». *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 1. С. 119–128.
11. Коротинський А.П., Жученко О.А. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 36. С. 201–209.
12. Коротинський А.П., Жученко О.А. Дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*. 2019. № 4. С. 3–10.
13. Жосан А.А., Кірсань Є.С. Аналіз методів моделювання об'єктів з розподіленими. *Вісник Криворізького національного університету*. 2013. № 34.
14. Korotynskiy A., Zhuchenko O. Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2019. № 1/8. С. 70–78.
15. Жученко Л.К., Коротинський А.П. Ентропія як показник якості вуглеграфітової продукції. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : матеріали XIX Міжнар. наук.-прак. конф. аспірантів, магістрантів і студентів*. Київ, 2021.

References

1. Zhuchenko, L.K. (2020). Metodolohichni zasady doslidzhennia pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnykh protsesiv (termichna obrobka vuhletsevykh materialiv) – [Methodological principles of research on improving the efficiency of technological processes (thermal treatment of carbon materials)]. *Filosofia ta naukovo-tekhnichna tvorchiist u khronotopi tekhnichnoho universytetu : III Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia*. P. 147–150. [in Ukrainian]
2. Zhuchenko, L.K., Voloshchuk, V.A. (2020). Postanovka zadachi optymizatsii vyrobnytstva vuhlegrafitovoi produktsii na etapi vypaliuvannia – [Setting the problem of optimizing the production of carbon graphite products at the firing stage]. *Suchasni problemy naukovoho zabezpechennia enerhetyky : XVIII Mizhnarodna naukovo – praktychna konferentsiia molodykh vchenykh ta studentiv*. P. 4. [in Ukrainian]
3. Zhuchenko L.K. Postanovka zadachi optimalnoho keruvannia protsesom vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv – [Setting the problem of optimal management of the process of burning carbon products]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriiia "Tekhnichni nauky"*. Vol. 5. P. 81–85. [in Ukrainian]
4. Korotynskiy, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2017). Postanovka zadachi keruvannia protsesom vypaliuvannia u vyrobnytstvi vuhletsevykh vyrobiv – [Setting the problem of managing the firing process in the production of carbon products]. *Hirnychiy visnyk*. Vol. 102. P. 174–179. [in Ukrainian]
5. Markl, D., Wahl, P.R., Menezes, J.C., Koller, D.M., Kavsek, B. & Francois, K., et al. (2013). Supervisory control system for monitoring a pharmaceutical hot melt extrusion process. *AAPS PharmSciTech*. Vol. 14. P. 1034–1044. DOI: 10.1208/s12249-013-9992-7 [in English]

6. Panov, E.M., Karvatskyi, A.Ya., Shylovych, I.L., Leleka, S.V. & Pulynets. I.V. (2011). Pidvyshchennia efektyvnosti vypaliuvannia vuhlehrafitovykh zahotovok – [Increasing the firing efficiency of carbon graphite blanks]. *Visnyk NTUU “KPI”. Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*. Vol. 1. P. 25–30. [in Ukrainian]
7. Korotynskyi, A.P. (2020). Avtomatyzatsiia protsesu keruvannia bahatokamernymy pechamy vypaliuvannia vuhlehrafitovykh vyrobiv – [Automation of the process of controlling multi-chamber furnaces for firing carbon graphite products] : Doctor’s thesis. 190 p. [in Ukrainian]
8. Pulynets, I.V. (2014). Teploobmin v bahatokamernykh pechakhvypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv – [Heat exchange in multi-chamber furnaces of carbon graphite products] / *Min-vo osvity ta nauky Ukrainy*. Kyiv : NTUU “KPI”. 175 p. [in Ukrainian]
9. Korotynskyi, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2017). Postanovka zadachi keruvannia protsesom vypaliuvannia u vyrobnytstvi vuhletsevykh vyrobiv – [Setting the problem of managing the firing process in the production of carbon products]. *Hirnychiy visnyk*. Vol. 102. P. 174–179. [in Ukrainian]
10. Korotynskyi, A.P., & Zhuchenko, O.A. (2018). Doslidzhennia vplyvu nadlyshku povitria na protses vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv u kameri “pid vohnem” – [Study of the influence of excess air on the process of burning carbon products in a chamber “under fire”]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriiia “Tekhnichni nauky”*. Vol. 1. P. 119–128. [in Ukrainian]
11. Korotynskyi, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2018). Doslidzhennia vplyvu pochatkovoï temperatury povitria na temperaturnyi rezhym protsesu vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv u kameri “pid vohnem” – [Study of the influence of the initial air temperature on the temperature regime of the process of burning carbon products in the chamber “under fire”]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriiia “Tekhnichni nauky”*. Vol. 36. P. 201–209. [in Ukrainian]
12. Korotynskyi, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2019). Doslidzhennia vplyvu vytraty palyva na temperaturni polia pechi vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv – [Study of the effect of fuel consumption on the temperature fields of the furnace for burning carbon products]. *Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni Admirala Makarova*. Vol. 4. P. 3–10. [in Ukrainian]
13. Zhosan, A.A. & Kirsan, Ye.S. (2013). Analiz metodiv modeliuvannia obiektiv z rozpodilenyymi – [Analysis of methods of modeling objects with distributed]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*. Vol. 34. [in Ukrainian]
14. Korotynskyi, A. & Zhuchenko, O. (2019). Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Vol. 1/8(97). P. 70–78. [in English]
15. Zhuchenko, L.K. & Korotynskyi, A. (2021). Entropiia yak pokaznyk yakosti vuhlehrafitovoi produktsii – [Entropy as an indicator of the quality of carbon graphite products]. *Suchasni problemy naukovoï zabezpechennia enerhetyky : XIX mizhnar. nauk.-prak. konf. aspirantiv, mahistrantiv i studentiv*. [in Ukrainian]

Жученко Людмила Костянтинівна – аспірантка кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: liudmylazhuchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5073-7314.

Zhuchenko Liudmyla Kostiantynivna – Graduate Student at the Department of Automation of Energy Processes of the National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”, e-mail: liudmylazhuchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5073-7314.