

О. В. ПІПКО

магістр кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень
Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID: 0009-0006-3543-904X

І. А. ГЕТЬМАН

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень
Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID: 0000-0003-1835-425

М. А. ДЕРЖЕВЕЦЬКА

кандидат економічних наук,
доцент кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень
Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID: 0000-0002-9952-499

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТУНЕЛЬНОЇ ПЕЧІ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ, ЩО ВИПАЛЮЄТЬСЯ

Актуальність ефективного використання енергоресурсів у виробництві та економія природного газу визначають необхідність удосконалення систем математичного моделювання тунельних печей. Стаття розглядає проблему зменшення витрат природного газу та покращення якості продукції шляхом оптимізації співвідношення газу та повітря. У роботі розглядаються три основні схеми регулювання співвідношення природний газ/повітря. Автори пропонують перейти на рівень MES-системи, інтегруючи математичні моделі існуючої та пропонованої систем. Моделювання дозволяє довести можливість оптимізації горіння, зменшення витрат газу та точніше визначити температурні параметри. Додатково розглядається обмін даними між програмною системою моделювання та автоматизованою системою управління, що спрощує контроль технологічного процесу та дозволяє автоматично формувати режимну карту агрегату. Стаття також висвітлює переваги інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації регулювання пальників у тунельних печах. Це дозволяє розглядати не лише традиційні методи, але і розвивати нові підходи до ефективного використання енергоресурсів. Підкреслює необхідність використання передових технологій для автоматизації та оптимізації процесів, що стосуються споживання природного газу в тунельних печах. Майбутні плани включають розширення системи на інші види енергоресурсів для ще більшої оптимізації роботи технологічного агрегату та точного визначення собівартості продукції на етапі замовлення. Ця робота є кроком до створення більш універсальних та ефективних систем управління енерговитратами в промисловості, які будуть пристосовані до різних видів виробництва та типів енергетичних ресурсів. При цьому акцентується на важливості збереження енергії та зниженні витрат природного газу, сприяючи при цьому якісному підвищенню виробничих показників.

Ключові слова: тунельна піч, енергоефективність, математичне моделювання, MES-система, співвідношення газу/повітря, автоматизована система управління, прогнозування витрат газу.

O. V. PIPKO

Master at the Department of Digital Technologies
and Project-Analytical Solutions
Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC
ORCID: 0009-0006-3543-904X

I. A. GETMAN

Ph.D. (Technology), Lecturer at the Department of Digital Technologies
and Project-Analytical Solutions
Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC
ORCID: 0000-0003-1835-425

M. A. DERZHEVETSKA

Ph.D. (Economics), Lecturer at the Department of Digital Technologies
and Project-Analytical Solutions
Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC
ORCID: 0000-0002-9952-499

ANALYSIS OF THE SUBJECT AREA FOR THE SOFTWARE SYSTEM OF MATHEMATICAL MODELING OF A TUNNEL OVEN IN ORDER TO REDUCE NATURAL GAS CONSUMPTION AND IMPROVE THE QUALITY OF FIRED PRODUCTS

The relevance of efficient use of energy resources in production and saving of natural gas determine the need to improve mathematical modelling systems for tunnel oven. The article considers the problem of reducing natural gas consumption and improving product quality by optimising the gas/air ratio. Three main schemes for regulating the natural gas/air ratio are considered. The authors propose to move to the MES system level by integrating mathematical models of the existing and proposed systems. The modelling allows to prove the possibility of combustion optimisation, reduction of gas consumption and more accurate determination of temperature parameters. In addition, the authors consider data exchange between the modelling software system and the automated control system, which simplifies process control and allows automatic generation of the unit's mode map. The article also highlights the benefits of integrating artificial intelligence and machine learning to optimise burner control in tunnel oven. This allows us to consider not only traditional methods, but also to develop new approaches to the efficient use of energy resources. It emphasises the need to use advanced technologies to automate and optimise processes related to natural gas consumption in tunnel oven. Future plans include the expansion of the system to other types of energy resources to further optimise the operation of the process unit and accurately determine the cost of production at the ordering stage. This work is a step towards creating more versatile and efficient energy management systems in industry that will be adapted to different types of production and types of energy resources. It emphasises the importance of energy conservation and reducing natural gas consumption, while contributing to a qualitative improvement in production performance.

Key words: tunnel oven, energy efficiency, mathematical modelling, MES-system, gas/air ratio, automated control system, gas consumption forecasting.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день дуже актуальною проблемою є економія енергоресурсів, оскільки вартість їх постійно зростає, в тому числі і природного газу. Тому їх економія стає дуже актуальним питанням. Наприклад, на основі даних, які є у вільному доступі, вартість природного газу на протязі 2022 року зросла з 12242 грн. за 1000 м³ до 28972 грн. за м³ по максимальному значенню (табл. 1, рис. 1), що у відсотковому еквіваленті дорівнює 136%.

З економічної точки зору чим менше використовується при використанні енергоресурсів, чим буде меншою собівартість кінцевої продукції. Тому економія енергоресурсів стає дуже актуальним питанням.

Таблиця 1

Зміна вартості газу за 2022 рік

№ з/п	Дата	Вартість, грн	Відсоток збільшення відносно попереднього періоду, %	Відсоток збільшення відносно початку року, %
1	01.02.2022	12242	-	-
2	01.04.2022	13656	11,55	11,55
3	01.07.2022	28972	112,16	136,66
4	01.10.2022	26279	-9,30	114,66
5	01.01.2023	19100	-27,32	56,02

Один із способів, який дозволяє забезпечити економію природного газу – це забезпечити найбільш якісний режим паління за рахунок оптимального співвідношення природний газ/повітря. Саме за рахунок цього досить розповсюдженого способу і пропонуватиметься зменшити витрату природного газу.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає в аналізі існуючих схем оптимального співвідношення природний газ/повітря в тунельних печах з метою забезпечення економії природного газу та покращення якості випалюваної продукції. Обґрунтування важливості цієї теми базується на необхідності ефективного використання енергоресурсів, зокрема природного газу, в умовах зростання його вартості. Аналізуючи існуючі схеми регулювання співвідношення

природний газ/повітря, можна визначити їхні переваги та недоліки. На сьогоднішній день, важливо розглядати не лише традиційні методи, але й розвивати нові підходи для оптимізації цього співвідношення. Наприклад, можна розглянути використання передових технологій, таких як штучний інтелект або машинне навчання, для автоматизації та оптимізації регулювання пальників у тунельних печах.

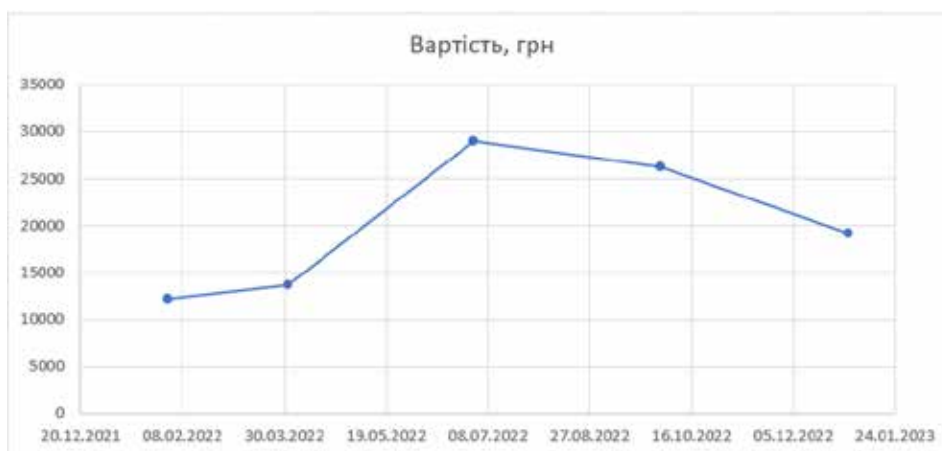


Рис. 1. Зміна вартості газу за 2022 рік

Викладення основного матеріалу дослідження

На сьогоднішній день отримало розповсюдження три основні схеми по реалізації оптимального співвідношення природний газ/повітря: з використанням зворотних зв'язків від виконавчих пристроїв природного газу та повітря; з використанням сигналів від датчиків тиску на пальнику на природному газі та повітрі; з використанням сигналів від датчиків тиску на пальнику на природному газі та повітрі, а також сигналу від киснеміра на димових газах [1].

В першому випадку на етапі теплотехнічної наладки задаються значення режимної картки (крапки оптимального співвідношення природний газ/повітря), після чого вони записуються у контролер і контролеру подальшому працює по цій кривій. При цьому вважається, що тиск природного газу в колекторі залишається незмінним. А це не завжди відповідає дійсності. Відповідно при зміні тиску природного газу на вході порушується задане співвідношення та оптимальний режим паління. Також при наявності стабільного тиску природного газу співвідношення може порушуватися завдяки тому, що калорійність природного газу, його хімічний склад може змінюватися.

Основними елементами такої системи є два виконавчі пристрої, які розташовані на газопроводі та повітропроводі. На кожен з них підведено сигнал управління та сигнал зворотного зв'язку стосовно положення засувки виконавчого пристрою. Окремо варто відзначити, що такі системи стосовно розрідження працюють на природній тязі (рис. 2) [1, 2].

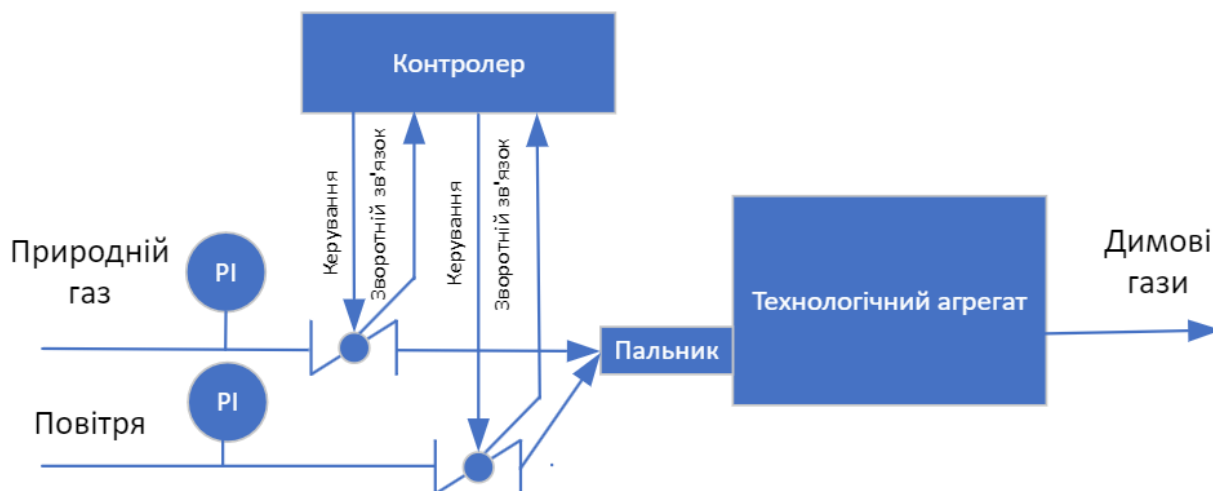


Рис. 2. Схема використання датчиків тиску природного газу та повітря

На кожен з них підведено сигнал управління та сигнал зворотного зв'язку стосовно положення засувки виконавчого пристрою. Окремо варто відзначити, що такі системи стосовно розрідження працюють на природній тязі. З економічної точки зору така схема буде дуже погано працювати. При найменшому порушенні співвідношення природний газ/повітря буде утворюватися недопал, не весь природний газ буде спалюватись або частина тепла з зайвим повітрям буде вилітати з топки печі. Як правило, такі системи використовуються на невеличких технологічних агрегатах, наприклад, водогрійний котел НІСТУ-5 (рис. 3) [3].



Рис. 3. Водогрійний котел НІСТУ-5, внутрішня частина

В нашому випадку таку систему недоцільно використовувати, оскільки забезпечити якісний режим паління вона не зможе на такому технологічному агрегаті, як тунельна піч.

Друга схема, яка отримала велике розповсюдження – це використання датчиків тиску природного газу та повітря (рис. 4) [1, 2]. Замість значень сигналів зворотного зв'язку в цьому випадку використовується уніфіковані токові сигнали з датчиків тиску природного газу та повітря.



Рис. 4. Схема використання датчиків тиску природного газу та повітря

Також варто відзначити, що до складу такої системи входить димотяг разом з контуром управління, який регулює розрідження в топці технологічного агрегату.

Такий підхід дозволяє вирішити проблему з коливанням тиску природного газу в колекторі, оскільки підтримується саме задане значення тиску. Відповідно підтримувати оптимальне співвідношення газ/повітря буде значно простіше. Проте при коливаннях калорійності природного газу можливі порушення співвідношення. Такі системи використовуються, наприклад, на таких агрегатах, як водогрійні котли серії ПТВМ (рис. 5) [5] або КВГМ, наприклад КВГМ-6,5-150 (рис. 6) [5]. У випадку тунельної печі даний спосіб недоцільно використовувати, оскільки забезпечити якісний режим паління така реалізація не дозволить, оскільки вона не дозволить забезпечити оптимальне співвідношення природний газ/повітря.

Ще один більш просунутий та більш якісний спосіб базується на використанні датчиків тиску природного газу та повітря разом з киснеміром [1]. Останній дозволяє оцінити якість згорання природного газу за рахунок визначення відсотку кисня в димових газах. Саме зараз така система і працює на тунельній печі. Зовнішній вигляд тунельної печі наведено на рисунку 7 [5].



Рис. 5. Водогрійний котел серії ПТВМ (Зовнішній вигляд)



Рис. 6. Водогрійний котел КВГМ-6,5-150



Рис. 7. Зовнішній вигляд тунельної печі

Останній дозволяє визначити якість згорання природного газу за допомогою вимірювання концентрації кисню в димових газах. В усьому іншому ця схема аналогічна раніше наведеній, котра базується на використанні сигналів датчиків тиску природного газу та повітря.

Схема використання датчиків тиску природного газу та повітря разом з киснеміром наведена на рисунку 8 [6]. Фактично єдиною зміною у неї є додавання киснеміру.

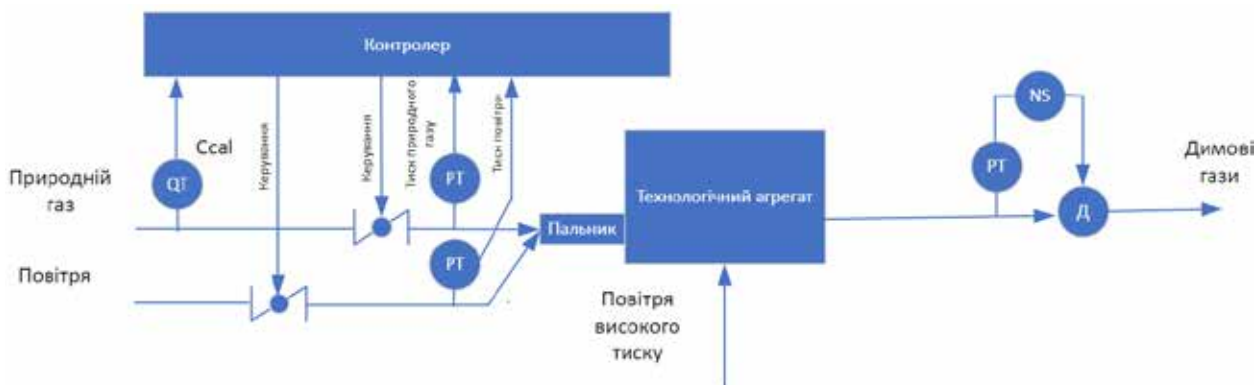


Рис. 8. Схема використання датчиків тиску природного газу та повітря разом з киснеміром

У цієї схеми є два суттєвих недоліки. Перший із них – топка печі негерметична, відповідно, присутні підсмоктування повітря. Також до топки печі подається повітря високого тиску. Як результат, визначити точно відсоток кисню у димових газах, який після паління неможливо. Також при коливаннях калорійності газу можуть бути проблеми, які призведуть до порушення оптимального співвідношення природний газ/повітря.

Відповідно така схема працеспроможна у нашому випадку, але забезпечити максимальну якість згорання природного газу вона не може. Річ в тому, що в топці печі, окрім повітря паливників, подається також і повітря високого тиску. Відповідно оцінити якість згорання природного газу неможливо, оскільки в димових газах будуть присутні і повітря паливників, і повітря високого тиску. Для якісного згорання природного газу пропонується використати калориметр, який в режимі реального часу буде визначати кількість калорій у природному газі. Відповідно можна буде точно задати на певну температуру у топці печі кількість калорій природного газу, витрату та тиск природного газу разом з тиском повітря.

Фактично така система дозволить ще до створення обурення налаштувати співвідношення природний газ/повітря. Також вона не буде залежати від концентрації кисню в димових газах. Саме таку систему пропонується змонтувати на тунельній печі.

Схема використання датчиків тиску природного газу та повітря разом з калориметром наведена на рисунку 9. Фактично єдиною зміною у неї є відсутність киснеміру, та додавання калориметру.



Рис. 9. Схема використання датчиків тиску природного газу та повітря разом з калориметром

Від попередньої схеми вона буде відрізнятися лише тим, що буде відсутній киснемір, а замість нього буде встановлений калориметр. За рахунок цього повинен бути забезпечений більш якісний режим паління природного газу, який не буде залежати від тих факторів, на які не можна вплинути або не можливо точно виміряти.

Висновки

Наведена раніше інформація стосується автоматизованої системи управління технологічним процесом. В нашому ж випадку більш доцільно перейти на рівень MES-системи, до складу якої ввійде дві математичні моделі: для існуючої системи та для пропонуємої. Виконати два різних моделювання та доказати можливість покращення горіння палива, зменшення його витрати за рахунок оптимального співвідношення природний газ /

повітря, покращення якості продукції в кінцевому підсумку за рахунок більш точного дотримання значення температур кривої нагрівання. Також потрібно уділити увагу розрідженню, значення якого потрібно буде точно визначити на етапі моделювання за допомогою чисельних методів.

Також пропонується налаштувати обмін даними між програмною системою математичного моделювання тунельної печі з метою зменшення витрати природного газу та покращення якості продукції, що випаляється, та автоматизованою системою управління технологічним процесом тунельної печі. Це дозволить автоматично формувати режимну карту технологічного агрегату. Це дозволить спростити контролювання технологічного процесу випалювальником.

Крім того, такий підхід дозволить також прогнозувати витрати природного газу на випалення продукції. А це, в свою чергу, дозволить визначити, хай і частково, собівартість продукції.

Якщо в майбутньому таку систему промаштабувати та доповнити математичними моделями тунельної печі по іншим видам енергоресурсів (наприклад, електроенергії або стисненого повітря), то можна буде ще більше оптимізувати роботу технологічного агрегату та більш точно визначити собівартість продукції ще на отриманні замовлення.

Перспективою є розробка програмної системи математичного моделювання, яка враховуватиме нові підходи та дозволить визначити оптимальні параметри для досягнення економії ресурсів та підвищення якості випалюваної продукції.

Список використаної літератури

1. А.М. Тігарев, Т.Г. Тігарева. Удосконалення систем регулювання водогрійних котлів. Журнал «Інформатика та математичні методи в моделюванні». 2022. Т. 1–2, С. 94–102. URL: http://immm.op.edu.ua/files/archive/n1-2_v12_2022/immm_n1-2_v12_2022.pdf
2. Конспект лекцій з дисципліни «Автоматизація теплових процесів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, Кам'янське : ДДТУ, 2019. С. 138. URL: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-z_kl58.pdf
3. Котел НІСТУ-5, URL: <https://mmzavod.com.ua/index.php/kotly-vodogrejnye/kotel-niistu-5>
4. Котли серій KB-ГМ та ПТВМ, URL: https://energetik.ua/catalog/vodogriyni_kotly/kotli-vodogriyni-serii-ptvm/
5. Тунельна піч для випалу цегли: огляд, різновиди, технологія, URL: <http://poradu24.com/remontu/tunelna-pich-dlya-vipalu-cegli-oglyad-riznovidy-tekhnologiya.html>
6. Регулювання співвідношення паливо/повітря, URL: <https://studfile.net/preview/9229697/page:4/>
7. Анастасенко С.М., Бугрім Л.І., Білюк І.С., Гаврилов С.О., Жигуліна В.В., Семенов М.М., Шостак О.В. А64 Основи автоматизації об'єктів теплоенергетики. Навчальний посібник для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика». Миколаїв: НУК, Львів, «Новий Світ-2000», 2020. 111 с. URL: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/212f1c0c-2e94-43ef-a85a-52434576eb21/content>

References

1. Tigaryev, A. M., & Tigaryeva, T. G. (2022). Improvement of control systems for water boilers. Informatics and Mathematical Methods in Modeling, 1–2, 94–102. URL: http://immm.op.edu.ua/files/archive/n1-2_v12_2022/immm_n1-2_v12_2022.pdf
2. Lecture notes on «Automation of Thermal Processes» for higher education students in the field of Heat Power Engineering. Kamianske: DDTU, 2019. p. 138. URL: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-z_kl58.pdf
3. NIISTU-5 Boiler. (n.d.). URL: <https://mmzavod.com.ua/index.php/kotly-vodogrejnye/kotel-niistu-5>
4. KV-GM and PTVM Series Boilers. (n.d.). URL: https://energetik.ua/catalog/vodogriyni_kotly/kotli-vodogriyni-serii-ptvm/
5. Tunnel Kiln for Brick Firing: Overview, Types, Technology. (n.d.). URL: <http://poradu24.com/remontu/tunelna-pich-dlya-vipalu-cegli-oglyad-riznovidy-tekhnologiya.html>
6. Fuel/Air Ratio Regulation. (n.d.). URL: <https://studfile.net/preview/9229697/page:4/>
7. Anastasenko, S. M., Bugrim, L. I., Bilyuk, I. S., Gavrilov, S. O., Zhigulina, V. V., Semenov, M. M., ... Shostak, O. V. (2020). Basics of automation of heat power objects: A textbook for students of the specialty 144 «Heat Power Engineering». Mykolaiv: NUK, Lviv, «Novyi Svit-2000». URL: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/212f1c0c-2e94-43ef-a85a-52434576eb21/content>