

М. З. АБДУЛІН, Ю. О. БЕТІН

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОПКОВОГО ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕЧЕЙ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

З проблемами ефективної організації топкових процесів у пекарських низькотемпературних печах зіткнулися світові виробники печей для харчової промисловості. З метою підвищення рівня ефективності організації топкового процесу в печах з виробництва кексів та вафельного листа до Науково-виробничого підприємства «СНТ», звернулося керівництво однієї із європейських компаній – виробників низькотемпературних печей малої потужності. Такі ж самі проблеми існують при роботі печей і на деяких кондитерських фабриках в Україні. Авторами статті був проведений аналіз ефективності організації топкових процесів у промислових пекарських печах, що працюють на природному газі, які організовані двома різними технологіями спалювання: у пекарській печі з випікання кексів топковий процес організований за допомогою пальникового пристрою вихрового типу, що працює в імпульсному режимі; у печі з випікання вафельного листа реалізована мікрофакельна технологія спалювання газу. Виявлено деякі недоліки використання вищезгаданих технологій для даних печей та запропоновано шляхи їх усунення.

Ключові слова: топковий процес, струменево-нішева технологія, пальниковий пристрій, імпульсний режим, мікрофакельна технологія.

М. ABDULIN, Yu. BIETIN

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE FURNACE PROCESS OF LOW-TEMPERATURE LOW-CAPACITY FURNACES

A review of studies of furnace processes in industrial furnaces has shown that there is a sufficient number of studies for high-temperature and medium-temperature furnaces. However, there is an insufficient understanding of furnace processes in low-temperature low-power furnaces. One of the most important factors in the working process of low-temperature ovens, in contrast to high-temperature and medium-temperature ovens, is a significantly lower level of temperature inhomogeneity. For example, in heating ovens in the machine-building industry, the temperature inhomogeneity is 30 °C...50 °C, while in baking ovens, temperature fluctuations of 5 °C...10 °C are permissible. The aim of this article is to analyze the efficiency of the organization of combustion processes in industrial baking ovens operating on natural gas, which are organized by two different combustion technologies: in a cupcake baking oven, the combustion process is organized using a vortex-type burner device operating in a pulse mode; in a wafer sheet baking oven, microflame gas combustion technology is implemented. Some disadvantages of using the above-mentioned technologies for the studied furnaces have been identified and ways to eliminate them by organizing furnace processes in these furnaces using jet-niche gas combustion technology have been proposed. Namely, the modernization of these furnaces with the replacement of standard burners with burners that implement the principles of jet-niche technology.

Key words: furnace process, jet-niche technology, burner device, pulse mode, microflare technology.

Вступ

У зв'язку з енергетичною та екологічною кризою у світі стає більш актуальним економічне та екологічне спалювання палива вогнетехнічними об'єктами, зокрема промисловими печами різної потужності та призначення.

Промислові печі різноманітні за своїм призначенням, сферами застосування і видами використовуваної енергії.

Теплова потужність печей варіюється в діапазоні від 10 кВт до 250 МВт.

За рівнем температур печі поділяються на:

- 1) Високотемпературні (рис. 1) (800 °C – 1800 °C);
- 2) Середньотемпературні (рис. 2) (450 °C – 800 °C);
- 3) Низькотемпературні (рис. 3), що працюють в діапазоні температур від 60 °C до 450 °C.

Одним із найважливіших факторів робочого процесу низькотемпературних печей, у відміну від високотемпературних та середньотемпературних печей є значно нижчий рівень температурної нерівномірності. Так, наприклад, у нагрівальних печах машинобудівної промисловості температурна нерівномірність становить 30 ° – 50 °C, тоді як в пе-

карських печах допустиме коливання температур 5 °C – 10 °C.

Огляд досліджень топкових процесів промислових печей відображений в роботах [1] – [3] стосується високотемпературних і середньотемпературних печей. Однак існує недостатність уявлення про топкові процеси в низькотемпературних печах малої потужності.

Мета роботи

Метою даної роботи є проведення аналізу ефективності організації топкових процесів у промислових пекарських печах, що працюють на природному газі, які організовані двома різними технологіями спалювання: у пекарській печі з випікання кексів (рис. 1) топковий процес організований за допомогою пальникового пристрою вихрового типу, що працює в імпульсному режимі; у печі з випікання вафельного листа (рис. 2) реалізована мікрофакельна технологія спалювання газу. Виявлено деякі недоліки використання вищезгаданих технологій для даних печей та запропоновано шляхи їх усунення.

Результати досліджень

Для вирішення першої частини завдання було надано промислову піч із випікання кексів з необхідною приладовою базою та штатом технічного персоналу.

В умовах близьких до промислової експлуатації проведено дослідження пальникового пристрою (ПП) вихрового типу, що працював в імпульсному режимі. Забезпечити необхідний технологічний режим можна було тільки за рахунок періодичного (раз у 2,5 хвилини) включення та виключення пальникового пристрою. Тобто палик працював в імпульсному режимі у зв'язку з недостатнім діапазоном регулювання за потужністю (ПП не мав змоги працювати на малих витратах газу). Під час роботи палика отримані унікальні дані (рис. 3), згідно яких у продуктах згорання було експериментально виявлено присутність палива, що не було спалено (чистий метан); у перехідних часових зонах роботи палика одразу після включення та виключення були зафіксовані наднормативні викиди чадного газу (рис. 4); також зафіксовано небажане коливання середнього рівня температур (рис. 5) для технологічного процесу (діапазон коливання складав близько 17 °С – біля 10 % температурної нерівномірності).

Відомі роботи [4] по створенню високоефективного ПП на основі струменево-нішевої технології базуються на застосуванні струменево-нішевого модулю (рис. 6), який замикає на собі всі елементи робочого процесу ПП (рівномірна роздача пального у потоці окислювача, сумішоутворення, підпал та стабілізація горіння, формування необхідних полів концентрацій, температур і швидкостей) [5].

З таких модулів фактично і набирається палик будь якою необхідної потужності з високим рівнем показників ефективності спалювання палива. Але до цього часу не було достатнього досвіду роботи паликів Науково-виробничого підприємства «Струменево-нішева технологія» м. Київ (далі СНТ) невеликої потужності ($N < 150$ кВт).

Розроблений на базі одного модуля невеликої потужності палик СНТ був використаний на аглофабриці ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат» (рис. 7), де було проведено його ретельне дослідження та отримані унікальні результати. Підтверджено, що модернізація машини випалення вапна КМ-14 на основі базового модуля СНТ, знизило витрати природного газу удвічі, на що мається відповідні референції. За результатом проведених робіт було модернізовано усі машини КМ-14 аглофабрики ММК ім. Ілліча. Отримані показники роботи створеного палика, що відповідав усім вимогам робочого процесу кондитерської печі по випіканню кексів, були направлені керівництву компанії Замовника.

Крім того під час випробувань були зняті зривні характеристики роботи паликів і порівняні зі зривними характеристиками паликів розгляданої пекарської кекс-печі (рис. 8). Виявилось, що зривні характеристики ПП СНТ приблизно у 6 разів нижче за зривні характеристики штатного палика кекс-печі.

Друга частина завдання полягала у більш ефективній організації топкового процесу пекарської печі по виробництву вафельного листу. Організація топкового процесу даної печі базується на мікрофакельній технології спалювання палива, яка реалізується за допомогою великої кількості газових форсунок невеликого розміру з малими діаметрами газороздавальних отворів (рис. 9).

Дослідження роботи цих печей дало наступні результати:

- у процесі роботи газорозподільчі отвори забиваються сажею (рис. 10), що кардинально впливає на роботу всіх форсунок і призводить до росту довжини факелів та накиду їх на технологічне обладнання печі. Це веде до виходу з ладу візків вафельниць.

- зростання довжини факелів та накид їх на технологічне обладнання (рис. 11) призводить до нерівномірності розподілу температур по поверхні вафельниць, що в свою чергу веде до зниження якості готової продукції.

Рішення цих проблем: Це завдання вирішувалась таким чином, що замість 300 газових форсунок планувалося встановити 20 паликів створених на принципах струменево-нішевої технології, які б давали рівномірне поле температур на короткій відстані до поверхні вафельниць та водночас ліквідували накиди факелів паликів на рухомі елементи печі – шасі візків вафельниць.

Для вирішення даної проблеми була розглянута можливість використання також базового струменево-нішевого модулю як і у першому випадку.

Але його потужність була надвелика. Тому була необхідність зменшити геометричні розміри палика для зниження його теплової потужності. При цьому проявився значний вплив на робочий процес ефекту Коанда [6], який суттєво зменшував діапазон регулювання палика. Тому подальше зниження витрат газу без зменшення розмірів модуля стало неможливим. У роботі [6] було виявлено, що надмірне зближення стінок повітряного каналу ПП призводить до суттєвого впливу крайових ефектів (рис. 12) на робочий процес ПП: на його структуру течії та якість сумішоутворення. Цей факт підтверджений при ретельному вивченні у лабораторних умовах цього процесу (фото). При цьому було встановлено критичний характерний розмір струменево-нішевого модуля в 50 мм – при якому починається значний вплив крайових ефектів. Щоб зменшити цей вплив, було прийняте рішення про перехід до палика циліндричної форми з круглим перетином (рис. 13).



Рис. 1 – Нагрівальний модуль пекарської печі з випікання кексів



Рис. 2 – Форсунки та візки з вафельницями



Рис. 3 – Схема розподілу часових зон робочого процесу пекарської кекс-печі

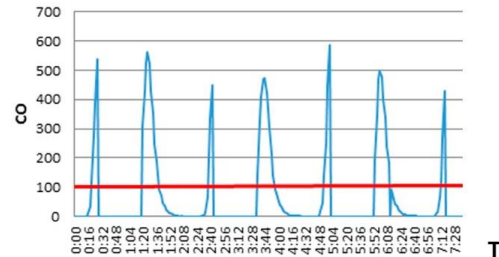


Рис. 4 – Зміна викидів CO в процесі роботи пальника

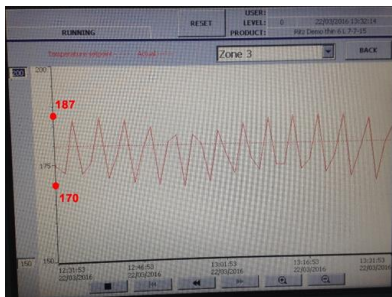


Рис. 5 Температурний режим роботи кекс-печі



Рис. 6 – Базовий струменево-нішевий модуль



Рис. 7 – Робота ПП СНТ на базі одного базового струменево-нішевого модулю

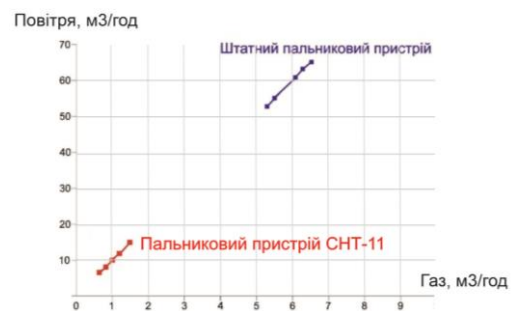


Рис. 8 – Зривні характеристики роботи пальників



Рис. 9 – Приклад організації мікрофакельного спалювання у печах з виробництва вафельного листа



Рис. 10 – Засмічення форсунки сажею



Рис. 11 – Накид факелів на технологічне обладнання

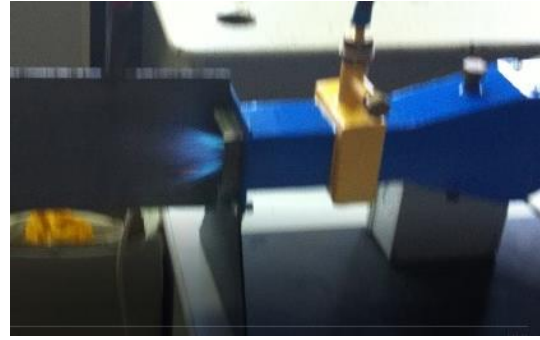


Рис. 12 – Виявлення крайового ефекту при зближенні стінок струменево-нішевого модуля



Рис. 13 – Пальник циліндричної форми з круглим перетином

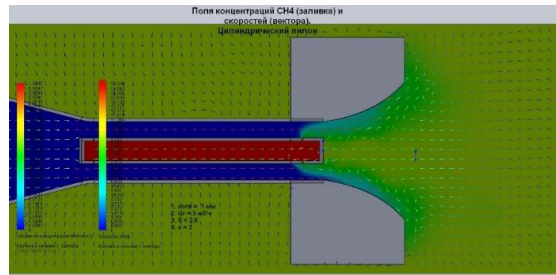


Рис. 14 – Оптимальна математична модель течії

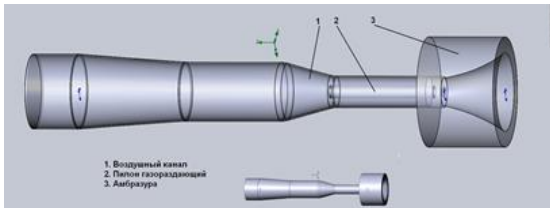


Рис. 15 – Експериментальний стенд випробування пальника необхідної потужності



Рис. 16 – Згоряння палива в об'ємі амбразури

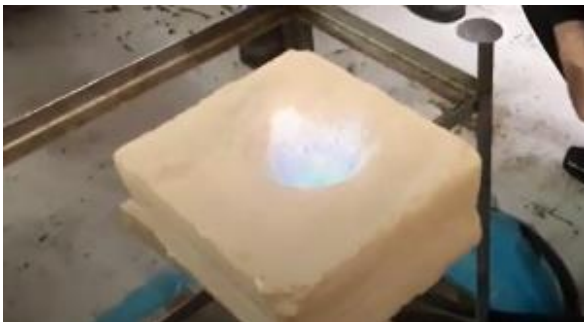


Рис. 17 – Вплив амбразури на параметри факелу



Рис. 18 – Запальний пристрій на основі циліндричного модуля СНТ

Для оптимізації його конструкції були проаналізовані математичні моделі течії у пальниках з наступними характеристиками газорозподільної системи (табл. 1) з діаметрами газороздавальних отворів 1 мм та коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 2$.

Таблиця 1 – Варіанти характеристик газорозподільної системи пальникових пристроїв

№ ПП	Витрата, м.куб/год	Відносний крок
1	1	2,5
2	3	2,5
3	5	2,5
4	1	3
5	3	3
6	5	3
7	1	3,5
8	3	3,5
9	5	3,5

Обраний найбільш оптимальний варіант (рис. 14) пройшов випробування на експериментальному стенді (рис. 15), які підтвердили наш вибір схеми пальника необхідної потужності і вибір розмірів відповідного діаметру та відносного кроку газороздавальних отворів.

З метою отримання необхідних характеристик факелу на заданій відстані було застосовано профілювання амбразури пальника (рис. 16, 17), внутрішня поверхня якої відтворює певну ділянку лівнескати Бернуллі, що призвело до певного формування структури течії продуктів згоряння на виході з пальникового пристрою. Це дозволило розтягнути фронт полум'я, зробивши висоту факелу мінімальною, що практично не виходить за межі амбразури. В результаті численних експериментів було виявлено, що при висоті факела до 150 мм спостерігається рівномірність температур, необхідна для отримання продукції необхідної якості.

Таким чином було збільшено поперечний розмір факела і за рахунок цього забезпечено повне згоряння палива в об'ємі амбразури.

В результаті проведених досліджень вдалося вирішити всі завдання, поставлені перед нами Замовником. А саме:

1) Виключити накиди факела на рухомі елементи печі - підшипники шасі вафельниць. Відсутність перегріву підшипників шасі вафельниць, продовжить термін їх експлуатації. Цей факт позначився б на значному збільшенні міжремонтного періоду печі.

2) Отримати на потрібній відстані від пальникових пристроїв рівномірне поле температур, необхідне для оптимального технологічного процесу, що в кінцевому підсумку впливатиме на підвищення якості продукції, що виготовляється.

Крім того, вперше холдингом СНТ був створений пальник на основі струменево-нішевої технології малої потужності з широким діапазоном сталої роботи, яку можна використовувати самостійно як пальниковий пристрій на об'єктах малої потужності, так і у складі штатного пальника, наприклад, в якості запального пристрою (рис. 18).

Висновки

1 Досліджено широко розповсюджений в робочому процесі печей імпульсний режим роботи вихрових пальникових пристроїв. Виявлені його недоліки. Експериментально досліджено склад продуктів згоряння в нестационарний період роботи пальникового пристрою. Експериментально отримані унікальні дані щодо вмісту в продуктах згоряння незгорілого метану (близько 20 % від загальної витрати) та наднормативних викидів чадного газу CO (близько 16 % часу роботи пальникового пристрою) внаслідок періодичного включення-виключення пальникового пристрою та неможливості організації робочого процесу на часткових режимах.

2 Досліджено вплив на робочий процес базового струменево-нішевого модуля зниження теплової потужності від 50 кВт до 5 кВт.

3 Обґрунтовано необхідність переходу при роботі на малих витратах газу з плоскої форми струменево-нішевого пілону на циліндричну форму струменево-нішевого пілону з високим ступенем кривизни газорозподіляючої поверхні.

4 Встановлено вплив ступеня кривизни газорозподіляючої поверхні циліндричного пілону на робочий процес пальника.

5 Реалізовано можливість роботи циліндричного модуля з довжиною факела не більше двох калібрів пальникового модуля.

Список літератури

1. Abdulin M., Siryi O., Zhuchenko A., Abdulin A. Improvement of reliability of fire engineering equipment based on a jet-niche technology / M. Abdulin, O. Siryi, A. Zhuchenko, A. Abdulin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 2, No. 8. – P. 12–19. – ISSN 1729-3774. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126917>.
2. Томаш М. А. Модернизация горелочного оборудования зажигательных горнов агломерационных машин аглофабрики ЧАО «ММК им. Ильича» / М. А. Томаш, Б. В. Изотов, А. Е. Турбаба, М. З. Абдулин, Г. Р. Дворцин, М. В. Гребинная // Метал та лиття України. – 2017. – № 1(284). – С. 16–19. – ISSN 2077-1304 (print). – ISSN 2706-5529 (on-line).
3. Абдулін М. З. Струменево-нішева технологія спалювання палива – вирішення проблем сучасних пальникових пристроїв / М. З. Абдулін, Г. Р. Дворцин, О. М. Жученко, Ю. А. Кулешов, О. І. Мілко // Праці XV міжнародної конференції «Теплотехніка та енергетика у металургії», 7–9 жовтня 2008 р., НМетАУ. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2008. – С. 5–6.
4. Абдулин М. З. Исследование рабочего процесса горелочных устройств на основе струйно-нишевых систем / М. З. Абдулин, А. А. Серый // Вісник НТУ «ХП». Серія:

- Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2013. – № 13(987). – С. 81–88. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line).
- Сірий О. А. Дослідження енергетичних показників струменево-нішевої системи спалювання палива / О. А. Сірий, М. З. Абдулін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2018. – № 12(1288). – С. 89–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.12.16>.
 - Абдулін М. З. Принципы организации рабочего процесса камер сгорания / М. З. Абдулін, А. А. Серый, А. М. Жученко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2014. – № 8(115). – С. 73–78. – ISSN 1727-7337 (print). – ISSN 2663-2217 (on-line).
- References (transliterated)**
- Abduln M., Siryi O., Zhuchenko A., Abduln A. (2018), “Improvement of reliability of fire engineering equipment based on a jet-niche technology”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 8, pp. 12–19, ISSN 1729-3774, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126917>.
 - Tomash M., Izotov B., Turbaba A., Abduln M., Dvorcyn G., Grebinna M. (2017), “Modernizacija gorelochnogo oborudovanija zashigatel'nyh gornov aglomeracionnyh mashin aglofabriki ChAO “MMK im. Il'icha” [Modernization of fiery furnace sinter machines of agglfactory PJSC “Ilyich Iron and Steel Works”]”, *Metal and casting of Ukraine*, vol. 1(284), pp. 16–19, ISSN 2077-1304 (print), ISSN 2706-5529 (on-line).
 - Abduln M. Z., Dvortsin G. R., Zhuchenko O. M., Kuleshov Y. A., Milko O. I. (2018), “Strumenevo-nisheva tehnologija spaljuvannja palyva – vyrishennja problem suchasnyh pal'nykovykh prystroi'v [Jet-niche technology of fuel combustion - solving the problems of modern burner devices]”, *Praci XV mizhnarodnoi' konferencii' «Teplotehnika ta energetyka u metallurgii», 7–9 zhovtnja 2008 r., NMetAU* [Proceedings of the XV International Conference “Heat Engineering and Energy in Metallurgy”], Nova ideologija, Dnipropetrovsk, pp. 5–6.
 - Abduln M. Z., Seryi A. A. (2013), “Issledovanie rabocheho processa gorelochnykh ustrojstv na osnove strujno-nishevykh sistem [Isothermic research of burners modules based on jet-niche systems]”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 13(987), pp. 81–88, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
 - Siryi A., Abduln M. (2018), “Analyzing Power Indices for the Jet-Niche Fuel Combustion System”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 12(1288), pp. 89–94, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.12.16>.
 - Abduln M. Z., Siryi O. A., Zhuchenko A. M. (2014), “Principy organizacii rabocheho processa kamer sgoranija [Principles of Working Procedure Organization of Combustion Chambers]”, *Aviaciono-kosmichna tehnika i tehnologija* [Aerospace technic and technology], vol. 8(115), pp. 73–78, ISSN 1727-7337 (print), ISSN 2663-2217 (on-line).

Надійшла (received) 20.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Абдулін Михайло Загреддинович (Abduln Mykhailo) – доктор технічних наук, професор кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: 050-462-75-52; e-mail: mzabdulin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9900-7314>.

Бетін Юрій Олексійович (Bietin Yurii) – аспірант кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; e-mail: betin@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5270-9634>.