

УДК 621.43.056

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/05>**Бстін Ю.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Абдулін М.З.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТОПКОВИХ ПРОЦЕСІВ У НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕЧАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

У роботі представлені результати дослідження енергоефективності та екологічності топкового процесу у промисловій низькотемпературній кондитерській печі малої потужності при використанні пального пристрою вихрового типу, що працює в імпульсному режимі. Вимірювання проводилися у трьох технологічних робочих режимах, регламентованих технологічними вимогами до випікання kek-сів: від 180°C до 220°C.

Досліджено проблему температурної нерівномірності у топковому просторі, що призводить до значного відсотка браку готової продукції, і зрештою – недоотримання кондитерськими фабриками певної частини прибутку. Температурна нерівномірність також суттєво позначається на стані обладнання та протязі його міжремонтного періоду.

На підставі проведених досліджень, зроблено висновок, що всі перелічені в статті проблеми пов'язані в першу чергу з вузьким діапазоном роботи пальника з закруткою потоку окислювача, який є недостатнім для втримання вимог технологічного процесу печі, що був досліджений.

Ключові слова: топкові процеси, низькотемпературні печі, економічність, екологічність, імпульсний режим, температурна нерівномірність.

Постановка проблеми. З метою захисту навколишнього середовища та зростання економічної безпеки виробничих підприємств, авторами статті були проведені дослідження енергоефективності та екологічності організації топкових процесів у промислових печах малої потужності, що працюють у діапазоні низьких температур. В першу чергу це вогнетехнічні об'єкти харчової промисловості. Проблема енергозберігаючого виробництва заслуговує в умовах сучасної економіко-екологічної кризи особливої уваги. Потреби підприємств харчової промисловості в паливі та енергії безперервно зростають. Одним із основних фінансово-економічних показників підприємств харчової промисловості є рентабельність. Її величина залежить від таких об'єктивних факторів, як зростання ціни на сировину, зростання тарифів на енергоносії, необхідність технічної реконструкції виробництва та ін. Для успішного

функціонування в умовах конкурентної боротьби виробниче підприємство у своїй діяльності повинне орієнтуватися на потреби ринку та на реалізацію досягнень науково-технічної революції.

Для вогнетехнічних об'єктів, що генерують теплову енергію під час виробничих процесів на підприємствах усіх галузей економіки України, **встановлені відомі вимоги до палинкових систем, які мають на меті саме підвищення енерго-екологічної ефективності їх роботи.** А саме: універсальність, надійність, стійкість запалювання і стабілізація фронту горіння в широких робочих діапазонах навантажень, забезпечення сумішоутворення заданої інтенсивності, забезпечення повноти згоряння газу при мінімальному коефіцієнті надлишку повітря, ремонтпридатність, незначний термін проведення модернізації та окупності, зниження споживання газу за рахунок зменшення питомих витрат, що позначиться на зниженні собівартості продукції [1].

Водночас з ефективністю газоспалювання, питання захисту довкілля також набуває все більшої актуальності та пріоритетності. Однією з основних забруднюючих речовин атмосферного повітря є оксиди азоту. Відсутність в Україні установок азотоочищення на більшості підприємств, де у технологічному процесі утворюються відхідні гази, що містять оксиди азоту, призводить до значних викидів його в атмосферу. Під впливом введення нормативно-правових документів [2] євроінтеграційне спрямування розвитку України ставить задачу відповідності екологічним стандартам Європейського Союзу, у якому гранично допустимі концентрації викидів оксидів азоту та інших шкідливих компонентів у відхідних газах нормуються згідно Директиви 20.01/8.0/Є.С [3] про промислові викиди та впровадження технологій безвідходного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день Україна не здатна відразу у повній мірі забезпечити відповідність актуальним світовим нормативам, так як парк енергетичного обладнання застарів і потребує фундаментальних робіт з модернізації та реконструкції. Вугілля тривалий час було стабільною основою паливно-енергетичного комплексу країни. Але продукти його згорання мають високу токсичність, до того ж, через військові дії на Донбасі, де розташовані найбільші запаси цього палива, видобуток дуже ускладнюється, вважають автори статті [4].

Відновлювана енергетика почала розвиватися та набирати потужності. З урахуванням даних фактів Україна опинилася в критичній ситуації, один із варіантів вирішення якої може бути газ. Тому багато розвинених країн орієнтуються на газ через його екологічність у порівнянні з іншими органічними паливами. В статті [5] наводиться приклад того, що в державних енергетичних стратегіях Німеччини та Китаю, де вугілля є основою енергетики, фігурує намір максимального заміщення цього палива у зв'язку з екологічними проблемами та пов'язаними з цим різким погіршенням умови життя.

На перший план, поряд з необхідністю технічної реконструкції, впровадженням європейських стандартів контролю якості, розробкою нових видів продуктів, найактуальнішими є дослідження з проблем зниження собівартості продукції й у першу чергу – економія палива та електроенергії, а також підвищення екологічності виробничих процесів.

Найбільш важливою з причин досліджень, що проводяться у галузі організації топкових процесів

у низькотемпературних печах малої потужності для кондитерської галузі харчової промисловості, є проблема температурної нерівномірності у топковому просторі, яка призводить до великого відсотку браку готової продукції, і зрештою - недоотримання кондитерськими фабриками певної частини прибутку. Також цей факт суттєво позначається на стані обладнання та тривалості часу його міжремонтного періоду.

Великі компанії-виробники кондитерських низькотемпературних печей, що працюють на газоподібному паливі, виділяють колосальні засоби для проведення науково-дослідної роботи, спрямованої на вдосконалення обладнання, що виробляється. Крім відомих міжнародних науково-дослідних центрів, до дослідницької роботи та проведення енергетичного аудиту в якості консультантів запрошуються науково-виробничі підприємства, які розробляють і впроваджують на практиці інноваційні технології для більш ефективної організації топкових процесів у промислових печах. Протягом більш ніж 20 років діяльність [6] українського науково-виробничого підприємства «Струменево-нішева технологія» (СНТ) у тісній співпраці з інститутом технічної теплофізики Національної академії наук України та Кафедрою теплової та альтернативної енергетики Інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету «КПІ імені Ігоря Сікорського», пов'язана з розробкою та впровадженням нових інноваційних технологій у галузі енергетики та охорони навколишнього середовища.

Постановка завдання. З метою визначення можливості підвищення рівня ефективності організації топкового процесу у низькотемпературних печах з виробництва кексів та вафель до науково-виробничого підприємства «Струменево-нішева технологія» звернулося керівництво компанії «HAAS FOOD EQUIPMENT GmbH» (Замовник), яка є однією з найбільших у світі виробників пекарських ліній для кондитерської галузі харчової промисловості, виробничі площі якої розташовані на п'яти континентах. При цьому обов'язковою умовою має бути досягнення максимально стабільного рівня температурної рівномірності з гарантованим дотриманням міжнародних норм екологічності, надійності та економічності роботи печі при використанні запропонованих варіантів підвищення ефективності.

За рішенням технічної ради компанії «HAAS FOOD EQUIPMENT GmbH», прийнятому після презентації струменево-нішевої технології та огляду діючого вогнетехнічного обладнання модернізованого

за допомогою даної інноваційної технології, у якості випробувальної бази була надана низькотемпературна піч для випічки кексів у спеціалізованому науково-дослідному центрі, розташованому на базі кондитерської фабрики HAAS-MEINCKE (Данія; Копенгаген) та штат австрійських фахівців з необхідною приладовою базою.

Для досягнення цілей дослідження було розроблено методологію вирішення поставлених завдань, яка передбачає:

- Оцінку діапазону регулювання штатного пального пристрою (ПП) у фіксованому часовому інтервалі на різних технологічних режимах роботи печі;

- Оцінку витрат та втрат паливного газу під час циклів роботи ПП у тому ж часовому діапазоні на різних технологічних режимах роботи печі;

- Визначення складу газів, що йдуть у циклах роботи ПП у тому ж часовому діапазоні з оцінкою тимчасових інтервалів наднормативних викидів на різних технологічних режимах роботи печі.

Для реалізації цієї методології були розроблені методики проведення перерахованих вище досліджень.

Треба додати що методики, що використовувались у наших дослідженнях, багато років розроблялися, апробувалися та вдосконалювалися у лабораторії горіння теплоенергетичного факультету Київського політехнічного інституту.

Для досягнення поставлених цілей було виконано наступне:

1. Проводилася зорова фіксація зривів та підпалів факела ПП у фіксованому часовому інтервалі;
2. Паралельно цьому проводилися вимірювання витрат газу на перерахованих вище режимах;
3. Фіксувалася температура газу та повітря;
4. На перерахованих вище режимах проводилися виміри складу продуктів згорання;
5. Для оцінки ефективності роботи печі і складання її теплового балансу було виміряно ряд узгоджених параметрів:

- Витрата газу на різних технологічних режимах роботи печі;

- Температура продуктів згорання на виході з печі;

- Температура холодного повітря на вході в піч;

- Температура повітря на вході рециркуляційного вентилятора;

- Температура повітря на вході модуля нагріву;

- Аналіз відпрацьованих газів: надлишку повітря, CO, CH₄, NO_x і температури відхідних газів до скидання в цю ж трубу відпрацьованого повітря з печі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Основна частина низькотемпературної печі для випікання кексів спеціалізованого науково-дослідного центру на фабриці HAAS-MEINCKE – це нагрівальний модуль, в якому встановлений палинковий пристрій вихрового типу одного з провідних виробників палиників для вогнетехнічних об'єктів. Виробнича потужність даного палиника від 35 до 200 кВт. (дані надані фабрикою).

Необхідно відзначити, що при експлуатації вогнетехнічних об'єктів у всіх існуючих світових галузях промисловості, основна частка витрати природного газу припадає на наступні підвиди палинкових пристроїв, розділених за своїми конструктивними особливостями на такі основні типи:

- вихрові із закруткою потоку окислювача;
- з зоною зворотних струмів за тілом, яке є поганообтічним;
- з інжекцією паливом потоку окислювача;
- подові палиники.

Сучасні палинкові пристрої, вироблені виробниками в усьому світі, в основному використовують застарілий, на наш погляд, перший тип ПП, який не зазнав будь-яких серйозних, принципових конструкторських змін протягом ось уже більше 20 років – вихрові палинкові пристрої із закруткою потоку окислювача. Діапазон робочого регулювання цих палиників є недостатнім для виконання вимог технологічного процесу, тому що надвеликі витрати газу при включенні та виключенні ПП призводять до надвеликих втрат (до 20%) палива. Що недопустимо виходячи з інформації на початку даної статті.

Саме таким типам палиників, нажаль, найчастіше віддають перевагу такі відомі виробники як: WEISHAUPТ, RIELLO, DREIZLER, CUENOD і т.д. Конструкторські бюро даних компаній давно скоротили витрати на розробку нових, ефективніших способів спалювання, зробивши ставку на вирівнювання економічних та екологічних показників роботи своїх палиників за рахунок:

- організації очищення відпрацьованих газів дорогими фільтрами та не менш дорогого їх обслуговування;

- великих витрат на електроніку, що контролює та регулює роботу палиника в режимах, заданих умовами технологічного процесу.

Отже, нагрівальний модуль печі служить для підігріву повітря, що йде на технологічний процес (схема з проміжним теплоносієм). У часовому діапазоні, в якому проводилися вимірювання, ПП працював в імпульсному режимі. Системою управління була запрограмована витрата газу

в 12,3 м³/год і виставлена температура, відповідна технологічним вимогам на наступних режимах роботи печі: перший і другий режим 180°C; третій режим – 220°C. Підтримка температурного режиму здійснювалася в автоматичному режимі за рахунок частоти включень і повних відключень ПП. Фіксація і реєстрація температурного режиму відбувалася за допомогою автоматики печі.

У нагрівальний модуль дослідницької печі подається повітря, частково відібране рециркуляційним вентилятором з потоку відпрацьованого повітря після технологічного процесу в кількості 8000 м³/год. Крім того, на вхід нагрівального модуля подається атмосферне повітря для розбавлення рециркуляційного повітря і зниження його вологості в кількості до 750 м³/год. Частина відпрацьованого повітря, що залишилася, разом з димовими газами подається в трубу. Повітря, що йде на технологічний процес, підігрівається в нагрівальному модулі, огинаючи топку і димогарні труби, через які проходить продукти згоряння, які генеруються в топці.

Для оцінки ефективності роботи печі і складання її теплового балансу було виміряно ряд узгоджених параметрів:

- Витрата газу на різних технологічних режимах роботи печі;
- Температура продуктів згоряння на виході з печі;
- Температура холодного повітря на вході в піч;
- Температура повітря на вході рециркуляційного вентилятора;
- Температура повітря на вході модуля нагріву;
- Аналіз відпрацьованих газів: Надлишку повітря, CO, CH₄, NO_x і температури відхідних газів до скидання в цю ж трубу відпрацьованого повітря з печі.

Результати досліджень представлені в наступній діаграмі (рис. 1), що разом з обробкою та аналізом отриманих результатів були представлені у попередній статті [7], що була опублікована у томі 33 (72) № 5, 2022 цього видання.

Прилади та похибки вимірювання.

Топкові процеси це складна взаємодія аеродинаміки, хімічної кінетики та теплопередачі у топковому просторі. Тому приладова база повинна враховувати всі складові процесу.

Похибка визначення витрати палива

Дослідження витрати палива на печі виконувалося за допомогою штатного лічильника газу Elster Quantometer QA 16 25 G1. Похибки визначення витрати пального розраховувалися відповідно до паспортних характеристик приладу:

- При пропускній здатності Q_{max} від 20% до 100% помилка становить +/- 1,5%;
- При пропускній здатності Q_{max} від 10% до 20% помилка становить +/- 3%.

Похибка вимірювання емісійних характеристик

Дослідження емісійних характеристик кондитерської печі виконувалося за допомогою газоаналізатору Testo 330 – 2L. Таким чином, похибки визначення концентрацій оксидів вуглецю, азоту, а також вмісту кисню розраховуються у відповідності до паспортних характеристик приладу.

Похибка визначення CO в діапазоні значень до 8000 ppm становить від ±2 ppm від показів при роздільній здатності сенсору 1 ppm.

Похибка визначення NO_x складає від ±2 ppm в діапазоні значень до 3000 ppm при роздільній здатності сенсору 1 ppm.

Похибка визначення вмісту O₂ в продуктах згоряння в діапазоні вимірювань 0...20% становить ±0,2% від показів при роздільній здатності сенсору 0,1%.

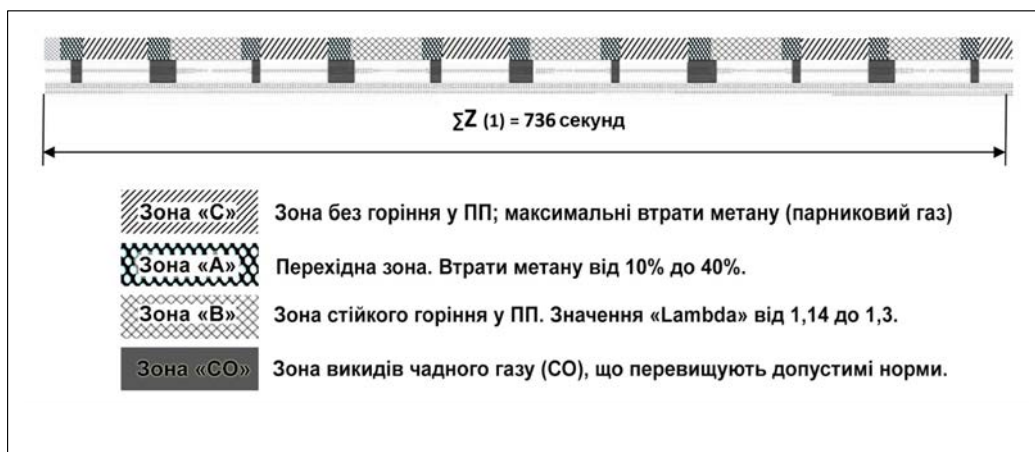


Рис. 1. Схема розподілу зон втрати метану та зон з наднормативними викидами CO

Похибка вимірювання температурних характеристик

Дослідження температурних характеристик кондитерської печі (температура продуктів згоряння на виході з печі; температура холодного повітря на вході в піч; температура повітря на вході рециркуляційного вентилятора; температура повітря на вході модуля нагріву) виконувалося за допомогою штатних приладів, що входять до контрольно-вимірювального блоку печі. Також, згідно з нашою методикою, було розроблено методи вимірювання характеристик температурної рівномірності в топковому просторі.

Висновки. Пальник працює в режимі великого горіння протягом контрольованого проміжку часу і потім циклічно перемикається в режим малого горіння або повністю вимикається. Цей цикл повторюється в середньому раз в 2,5 хвилини і проміжок часу, коли пальник працює в режимі «великого» горіння, потім в режимі «малого» горіння або відключена, керується процесорним контролером.

Штатний ПП з закруткою потоку окислювача, що здійснює організацію топкового процесу кондитерської низькотемпературної печі, від самого початку не здатне генерувати низькі (до 300°C) температури, починає швидко набирати температуру. Досягши максимальної технологічної температури в топковому просторі, автоматика вогнетехнічного об'єкта відключає пальник і включає, коли датчики фіксують мінімально допустиму технологічну температуру. Включення та відключення ГУ відбувається з чітким часовим інтервалом. Тобто спостерігається імпульсний режим, при якому ПП, згідно з отриманими та обробленими результатами вимірювань, працює в режимі оптимального навантаження лише 40% вибіркового часового інтервалу.

Решту часу пальник працює або на часткових навантаженнях, що не є для неї економічними, або не працює зовсім. Але під час в інтервалі між погасанням факелу та перекриттям газоподаючого клапану через пальник в атмосферу їде

газ, який не підпалюється по причині відсутності факелу.

Це має такі наслідки:

- Через вузький діапазон стійкої роботи ПП, при його відключенні та включенні мають місце режими, коли газ подається до ПП в умовах відсутності факела. У разі спостерігається викид чистого метану в атмосферу.

- Крім того, враховуючи неможливість підтримки необхідного співвідношення газ-повітря на змінних режимах, включення та вимкнення ПП (перехід на режим і вихід з режиму) супроводжуються великими викидами СО та незгорілого метану.

- Крім того, часті, з великою амплітудою, температурні коливання в камері топки можуть призвести до передчасного зносу матеріалу камери в нагрівальному модулі.

- Проблеми з пульсацією температури, що зумовлена імпульсним режимом ПП, можуть мати місце також у робочому об'ємі печі. Це може призвести до порушень технологічного процесу та погіршення якості готової продукції.

- Безперервні включення та вимкнення автоматики, як правило, призводять до передчасного зношування елементів клапанів, перемикаючих пристроїв та інших елементів дорогої автоматики ГУ. Це обов'язково призведе до частих замін елементів автоматики та перманентного дорогого сервісного обслуговування.

Одна з головних функцій будь-якої системи керування горіння – це регулювання підведення тепла відповідно до потреб процесу. При імпульсному горінні підведення тепла регулюється модуляцією частоти включення в роботу пальника. Проблемним моментом в роботі даної низькотемпературної печі малої потужності може бути використання пальникового пристрою вихрового типу, що працює в імпульсному режимі. Тому всі перераховані вище проблеми пов'язані в першу чергу з вузьким діапазоном роботи пальникового пристрою з закруткою потоку окислювача, який є недостатнім для організації ефективного топкового процесу в низькотемпературних вогнетехнічних об'єктах малої потужності.

Список літератури:

1. Громова О., Маркова Т. Доцільність використання екологічно чистих технологій енергозабезпечення на підприємствах харчової промисловості. Економіка харчової промисловості. 2010. С. 59–62.

2. ГКД 34.02.305-2002 Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51507 (дата звернення: 23.01.2023).

3. Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2015/2193 від 25 листопада 2015 року про обмеження викидів у повітря певних забрудників від середніх спалювальних установок. Офіційний веб-портал парламенту України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_022-15#Text (дата звернення: 23.01.2023).

4. Справжня ціна вугілля в умовах війни на Донбасі: погляд крізь призму прав людини / Д. Казанський та ін. ; ред. А. Некрасова. Київ : ТОВ «АРТ КН.», 2017. 140 с.

5. Абдулін М., Горбань К., Сірий О. Взаємозв'язок робочого процесу пальникового пристрою на основі струменево-нішової технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. № 1. С. 63–69.

6. Горбань К., Сірий О., Абдулін М. Можливості впливу струменево-нішової технології на екологічні та експлуатаційні параметри вогнетехнічного об'єкта. Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. Т. 2, № 6. С. 10–14.

7. Абдулін М., Бетін Ю. Особливості організації топкового процесу у печах малої потужності, що працюють в діапазоні низьких температур. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33(72), № 5. С. 199–204.

Bietin Yu.O., Abdulin M.Z. STUDYING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF ORGANIZING FURNACE PROCESSES IN LOW-TEMPERATURE LOW-CAPACITY FURNACES

The paper presents the results of research on energy efficiency and environmental friendliness of organization of the combustion process in an industrial low-temperature confectionary oven of small capacity using a swirl type burner operating in pulse mode.

The modern burners produced by the manufacturers in the whole world mostly use the vortex type burner with the swirling flow of oxidising agent, which in our opinion has not undergone any serious design changes for more than 20 years. The operating control range of these burners is not sufficient for low-temperature furnace processes because the start temperature, which these burners produce, is already higher than the temperature required by the process requirements. Therefore, these swirl burners must be operated in pulse mode in order to guarantee low-temperature combustion processes.

Measurements were taken in three operating modes regulated by the technological requirements for baking cakes: from 180°C to 220°C.

The problem of temperature irregularity in the furnace space, which leads to a high percentage of rejected finished products, and in the end - under-receipt by confectionery factories of a certain part of profit was investigated. Temperature irregularity also has a significant impact on the condition of the equipment and the length of its overhaul period.

Based on the research, it is concluded that all the problems listed in the article are primarily related to the narrow range of operation of the burner with a flow oxidizer swirl, which is insufficient for organizing an efficient furnace process in low-temperature fire facilities of low capacity.

Key words: *furnace processes, low-temperature furnaces, economy, environmental friendliness, pulse mode, temperature irregularity.*