

УДК 621.43.056

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/29>**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»

ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТОПКОВОГО ПРОЦЕСУ У ПЕЧАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В ДІАПАЗОНІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Огляд досліджень топкових процесів виявив їх значну кількість для високотемпературних та середньотемпературних печей. Однак має місце недостатність уявлення про організацію топкових процесів в низькотемпературних печах малої потужності.

Треба відмітити що для високотемпературних печей допускається температурна нерівномірність в десятки градусів по топковому простору. При цьому для низькотемпературних печей допустимий рівень нерівномірності є значно нижчим. Це також стосується пекарських печей харчової промисловості, де має місце рівень температур в діапазоні від 150 °С до 300 °С та мінімальні коливання середнього рівня температури. Крім того, в низькотемпературних печах малої потужності більш явно проявляють себе крайові ефекти. Так при зменшенні топкового простору стає значимим співвідношення його розмірів та геометрії прикордонних шарів (теплових та аеродинамічних). Також для малих печей необхідно зменшувати геометричні параметри елементів пального пристрою (ПП) і, відповідно, діаметри отворів подачі газу. Це суттєво впливає на аеродинаміку розвитку системи струменів, структуру течії в ПП і в результаті на якість сумішоутворення паливної суміші та стабілізацію горіння в ПП.

З цими проблемами зіткнулися світові виробники низькотемпературних печей харчової промисловості. У статті увага приділяється саме печам малої потужності, які працюють на газоподібному паливі в діапазоні низьких температур. Важливим етапом роботи було дослідження штатних ПП, що працюють в імпульсному режимі. Імпульсний режим – один з основних режимів роботи печей, який з'явився внаслідок обмеженого діапазону робочого регулювання існуючих ПП. В результаті досліджень виявлені особливості застосування в цих випадках існуючих вихрових та мікрофакельних технологій спалювання та шляхи підвищення ефективності печей малої потужності.

Ключові слова: струменево-нишева система, низькотемпературна піч, топковий процес, паливний пристрій вихрового типу, імпульсний режим.

Постановка проблеми.

Складна геополітична ситуація в Україні та у світі потребує максимально ефективної експлуатації вогнетехнічних об'єктів з виконанням вимог до економічності, екологічності та надійності роботи обладнання. У зв'язку з цим одним із аспектів підвищення рівня ефективності є вдосконалення стадій робочого процесу ПП (роздача пального в потоці окислювача; утворення паливної суміші; підпал паливної суміші; стабілізація процесу горіння та формування полів швидкості, температури та концентрації продуктів спалювання). Це дає змогу:

- знизити споживання газу за рахунок зменшення питомих витрат, що позначиться на зниженні собівартості продукції;

- гарантувати температурну рівномірність у топковому просторі, що підвищить якість продукції;

- покращити екологічні показники роботи печі до рівня міжнародних норм;

- підвищити надійність роботи пічного обладнання, що відчутно позначається на збільшенні його міжремонтного періоду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спалювання органічного палива забезпечує понад 90% світової потреби у первинній енергії. При цьому має місце суттєвий негативний вплив на навколишнє середовище. Тому до кожного проекту пред'являються підвищені вимоги з точки зору екологічної безпеки. Аналіз робіт іноземних авто-

рів свідчить, що в останні роки було проведено багато досліджень екологічно безпечних та ефективних технологій спалювання. У нашій роботі приділяється увага організації топкових процесів у пекарських печах малої потужності, що працюють на газоподібному паливі в діапазоні низьких температур, з використанням імпульсного режиму пальників. На думку авторів статті [1], такий режим роботи є одним з найбільш перспективних. У статті [2], присвяченій імпульсному управлінню пальниками, стверджується, що одна з головних функцій будь-якої системи управління горіння – це регулювання підведення тепла відповідно до потреб процесу. Під час імпульсного горіння підведення тепла регулюється модуляцією частоти включення в роботу пальника або кількох пальників. ПП працюють у режимі "великого" горіння протягом контрольованого проміжку часу і потім циклічно перемикаються в режим "малого" горіння або повністю вимикаються. Цей цикл повторюється досить часто. При цьому проміжок часу, коли пальник працює в режимі "великого" горіння, потім в режимі "малого" горіння або відключений, керується процесорним контролером. Таким чином, імпульсне горіння може бути назване частотно-модульованим горінням. Кожен пальник керується незалежно від інших пальників, що на думку авторів збільшує гнучкість та точність керування. Для забезпечення широкого діапазону зміни теплової потужності, пальниковий пристрій з обмеженим недостатнім діапазоном коефіцієнта робочого регулювання, повинен працювати в імпульсному режимі.

Традиційним системам спалювання, як правило, необхідно працювати в діапазоні між "великим" та "малим" горінням. Це – пропорційне спалювання, або амплітудно-модульоване спалювання. Зазвичай кілька пальників, які жорстко прив'язані системою автоматики один до одного, розпалюються і контролюються як група в цій системі. На перший погляд може здатися, що така система може забезпечити надійне та гнучке управління організацією топкового процесу. Незважаючи на зростання інтересу до технології імпульсного спалювання, відомості про її сучасний рівень ефективності значною мірою відсутні в літературі. Виникають сумніви щодо забезпечення рівномірності температурного поля у топковому просторі та надійності роботи складної та дорогої системи регулювання та контролю роботи печі.

За тематикою роботи у доступній літературі є інформація, яка вказує на шляхи організації топкових процесів з широким діапазоном регулю-

вання теплової потужності. Наприклад у роботі [3] описана модернізація котла ПТВМ-30 з застосуванням струменево-нишевої технології спалювання, метою якої було скорочення терміну сушіння футеровки після ремонту амбразур та інших елементів котла. При цьому потрібно було витримувати необхідний температурний рівень і рівномірність температурного поля продуктів спалювання в топковому просторі. Це робиться для того, щоби уникнути закипання вологі всередині футерування і порушення її цілісності. По нормативам для сушіння футеровки в топку котла завантажуються і спалюються дрова. Такий регламентований спосіб незручний, об'єкт висихає тривалий час та якість сушіння залишає бажати кращого. Вперше сушіння котлів ПТВМ-30 було здійснено за допомогою пальникового пристрою СНТ. Усі 6 пальників розпалилися при тиску газу 2-3 мм в.ст. при мінімальній тепловій потужності, що забезпечило середній температурний рівень у топці (близько 100°C). Завдяки цьому три котли було якісно висушено за кілька днів.

Постановка завдання. З метою підвищення рівня ефективності організації топкового процесу в печах з виробництва кексів та вафель до науково-виробничого підприємства (НВП) «СНТ» звернулося керівництво компанії «HAAS FOOD EQUIPMENT GmbH» – однієї з найбільших у світі виробників низькотемпературних кондитерських печей, фабрики якої розташовані на п'яти континентах.

Керівництво кондитерської фабрики «Домінік» (м. Полтава) також запропонувало НВП «СНТ» розглянути можливість підвищення рівня ефективності організації топкового процесу низькотемпературної турецької печі GOCMAN, яка виробляє вафельні листи з дотриманням міжнародних норм екологічності, надійності та економічності роботи печі.

Для вирішення поставлених завдань сформульовані наступні етапи робіт:

- організація та проведення ретельних еколого-теплотехнічних досліджень топкового процесу промислового зразка печі зі штатними ПП, працюючими в імпульсному режимі;
- розробка та створення експериментального стенда для дослідження модулів ПП на основі струменево-нишевої системи (СНС);
- розробка методики експериментальних досліджень :
 - штатних пальників вихрового типу, що працюють в імпульсному режимі і також ПП, що працюють на основі мікрофакельної технології

спалювання (екологічні характеристики, повнота вигорання, стійкість горіння);

- робочого процесу модуля ПП (стійкість горіння, діапазон регулювання, довжина факела, поля температури);

- пального пристрою в лабораторних умовах (стійкість горіння, діапазон регулювання, довжина факела, поля температури).

- проведення експериментальних досліджень модулів ПП на основі струменево-нишевої системи (СНС);

- проведення математичного моделювання робочого процесу модулів ПП на основі струменево-нишевої системи (СНС);

- розробка та експериментальне дослідження еколого-теплотехнічних характеристик робочої моделі ПП на основі СНС;

- проведення комплексних еколого-теплотехнічних досліджень топкового процесу низькотемпературної печі, організованого за допомогою нового ПП, що реалізує основні засади струменево-нишевої технології.

Методики, що використовуються у наших дослідженнях, багато років розроблялися, апробувалися та вдосконалювалися у лабораторії горіння [4,5] теплоенергетичного факультету Київського політехнічного інституту.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Дослідження проведені на низькотемпературних печах: кондитерська піч для випічки кексів (фабрика НААС-МЕЙНСКЕ; Данія) та кондитерська піч для випічки вафельного листа (фабрика ДОМИНИК; Полтава; Україна).

Дослідження на датській фабриці НААС-МЕЙНСКЕ проводилися на трьох робочих режимах дослідної низькотемпературної печі зі штатним класичним пальником вихрового типу.

Теплова потужність печі для випічки кексів знаходиться у діапазоні від 35 кВт до 200 кВт.

Для цього пального пристрій, що забезпечує організацію ефективного топкового процесу досліджуваних режимів роботи печі повинен мати коефіцієнт регулювання (K_p) близько к 10 і забезпечувати температурний рівень у топковому просторі в діапазоні від 180 °С до 220 °С залежно від технологічного режиму роботи печі.

У зв'язку з необхідністю досягнення широкого діапазону зміни теплової потужності, пального пристрій, будучи обмеженим недостатнім діапазоном коефіцієнта робочого регулювання, працював в імпульсному режимі. Тобто робота пальника складалася з циклів, що постійно чергуються: включення та вимикання пальника – залежно від досліджуваного режиму, приблизно раз на 2,5 хвилини. На основі отриманих результатів досліджень були визначені дані цикли в масиві даних і кожен з них був детально описаний.

Для визначення якості процесу спалювання газу в ПП вихрового типу в імпульсному режимі розглянемо виміряні дані за показаннями коефіцієнта надлишку повітря «Lambda», отриманому під час вимірювання газоаналізатором Testo 330 – 2L у часовому інтервалі (рис. 1) першого режиму. Відбір проб продуктів згоряння у вихлопному газоході для газового аналізу здійснювався інтегруючим зондом, що забезпечував усереднення показників.

Виходячи з побудованого графіку видно, що кожному часовому інтервалу режиму відповідає певна кількість, ідентичних між собою циклів.

Для визначення роботи ПП в кожному з відрізків циклу (насамперед щодо витрати газу), нами бралися часові інтервали виміру кожного з характерних проміжків (рис. 3). Потім, за даними щосекундного вимірювання газу, визначалася витрата газу на даному інтервалі.

Штатний пального пристрій вихрового типу що здійснює організацію топкового процесу печі

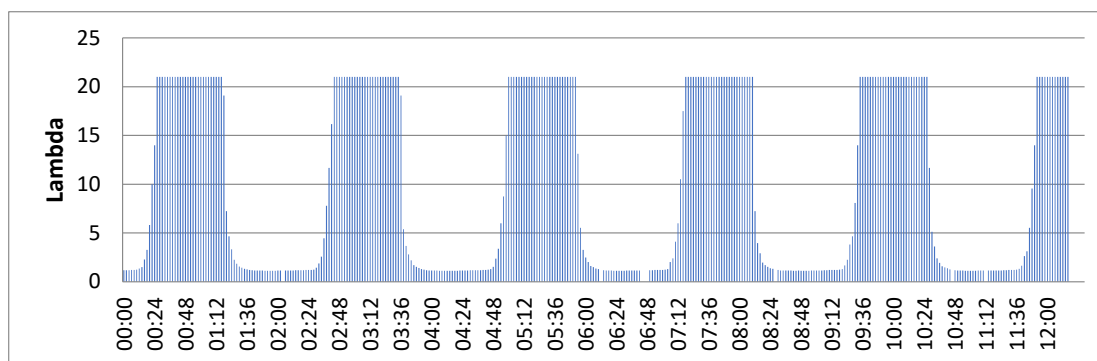


Рис. 1. Зміна Lambda в процесі роботи пальника у часовому інтервалі першого режиму (736 секунд)

(рис. 4; рис. 5), від самого початку не здатен генерувати температури нижче 300°C, в зв'язку з недостатнім діапазоном регулювання потужності.

Пальник починає швидко набирати температуру у продовженні зони В – зони стійкого горіння. Досягши максимальної технологічної температури в топковому просторі, автоматика печі відключає пальник: горіння відсутнє, починається зона С у якій спостерігаються максимальні втрати метану.

Коли датчики фіксують мінімально допустиму технологічну температуру, автоматика знов включає пальник. Включення та відключення ПП 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 відсотків вибіркового часового інтервалу. У перехідних зонах А та СО зафіксовано наявність метану та наднормативні

викиди окису вуглецю (рис. 6) в продуктах згорання.

Таким чином, наші дослідження, проведені на промислової кондитерської печі фабрики «НААС-МЕЙНСКЕ», дали повну характеристику роботи ПП працюючому в імпульсному режимі:

- нестабільні показники температурного рівня, що впливають на якість виробленої продукції;
- неповне спалювання палива;
- низький рівень екологічних показників (високий рівень емісії токсичних речовин: CO, CH₄);
- вузький діапазон регулювання теплової потужності;
- вплив на надійність роботи печі через часті відключення ПП, що приводить до передчасного зношення елементів системи контролю и регулювання роботи печі.

Отримані дані добре корелюються з результатами досліджень роботи дослідної турецької

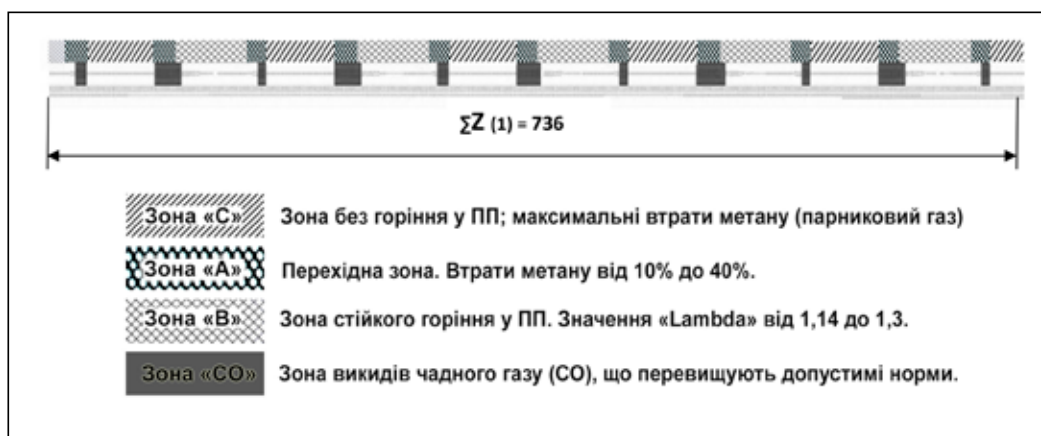


Рис. 3 Схема розподілу зон втрати метану та зон з наднормативними викидами CO



Рис. 4. Штатний пальник вихрового типу



Рис. 5. Нагрівальний модуль дослідної низькотемпературної печі на датській фабриці НААС-МЕЙНСКЕ

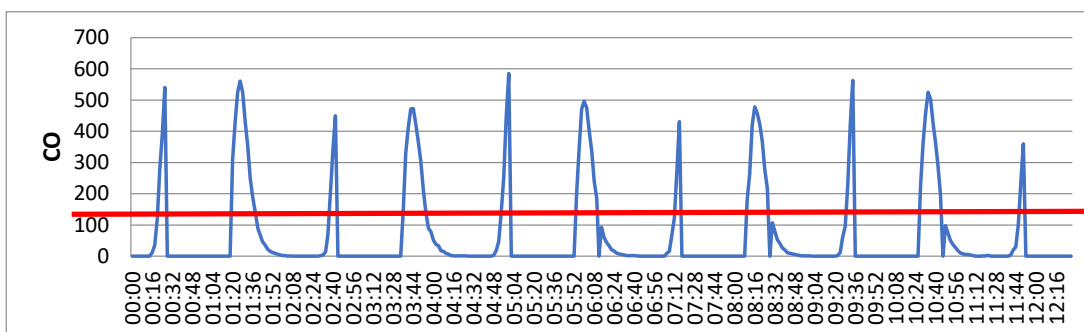


Рис. 6 Зміна викидів CO в процесі роботи пальника у часовому інтервалі першого режиму

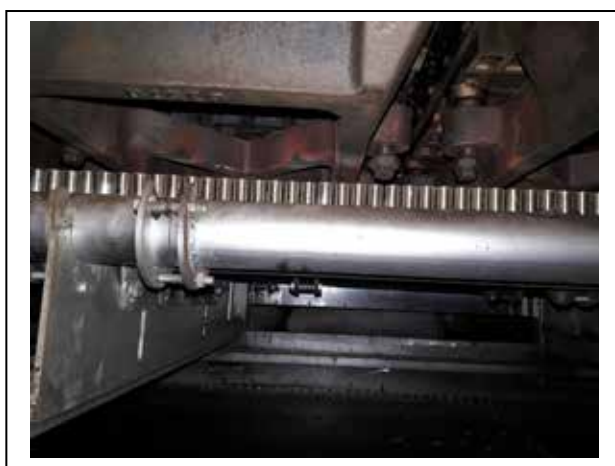


Рис.7. Ряд пальників-форсунок

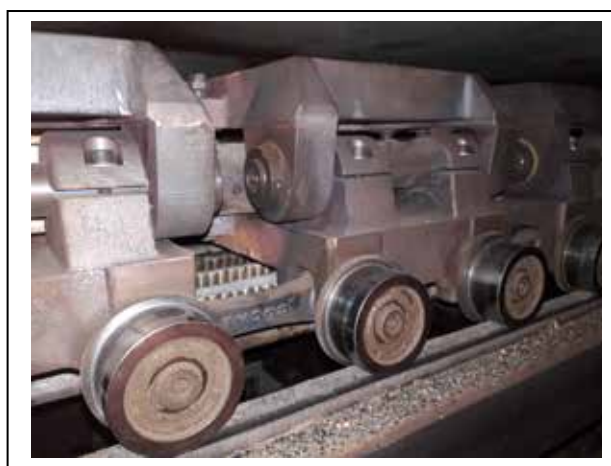


Рис. 8. Підшипники-шасі

низькотемпературної печі «ГОСМАН» з мікрофакельною технологією організації топкового простору. Піч не набирає необхідної температури навіть при 70% паспортної теплової потужності. Ця проблема негативно відбивається на технічному стані печі, на екологічності та економічності її роботи та найголовніше на якості готового продукту.

Результати дослідження застосування мікрофакельної технології при організації топкового процесу низькотемпературної вафельної печі:

- нестабільні показники температурного рівня в результаті зриву факела на окремих пальниках-форсунках (Рис. 7) горіння приводять до зниження якості продукції (ламкий, пересушений вафельний лист);
- в зв'язку з тим, що забиваються сажею окремі пальники-форсунки зафіксовано відсутність факела на цих пальниках. Це веде до перевитрати палива;
- низькі екологічні показники (CO понад 5000мг/м³);

• малі міжремонтні періоди роботи печі (довгий факел призводить до частого виходу з ладу підшипників (Рис. 8), що виконують функцію шасі в каретках із заготовками з тіста).

Висновки: Наші дослідження традиційних, поширених пальникових пристроїв, що використовуються у даних низькотемпературних печах, підтвердили недоліки застосування в цих випадках існуючих вихрових технологій, працюючих в імпульсному режимі, та мікрофакельних технологій спалювання. Огляд сучасних технологій показав, що існує струменево-нишева [6,7,8,9,10] технологія спалювання газу яка може дозволити організувати ефективний топковий процес для печей малої потужності, працюючих у діапазоні низьких температур.

Результати проведених нами досліджень і створений на базі даних результатів новий тип ГУ може бути високоефективною альтернативою ГУ вихрового типу, що використовуються в імпульсному режимі в промислових печах більшої потужності та різного застосування.

Список літератури:

1. Meng X., de Jong W., Kudra T. A state-of-the-art review of pulse combustion: Principles, modeling, applications and R&D issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. No. 55(C). P. 73–114.

2. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Изучение гидродинамических параметров работы устройств, предназначенных для создания низкочастотного пульсирующего расхода газообразных сред. *Металл и литье Украины*. 2014. № 2 (249). С. 32–35.
3. Способы повышения эффективности огнетехнических объектов / М.З. Абдулин та ін. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2011. № 26. С. 107–111.
4. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. 2005. № 6. С. 130–144.
5. Абдулин М.З. Струйно-нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 144. Київ, 1986. 18 с.
6. Струйно-нишевая технология сжигания топлива – основа надежной работы огнетехнического оборудования / М. Абдулин та ін. *Третья Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность крупного промышленного региона»*. Сборник научных трудов. 2008. С. 18–24.
7. Горбань К. С., Сірий О.А., Абдулін М.З. Возможности влияния струменево-нишевой технологии на экологичні та експлуатаційні параметри вогнетехнічного об'єкта. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Сер. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Power and Heat Engineering Processes and Equipment* : зб. наук. пр. 2021. Т. 6, № 2. С. 10–14.
8. Абдулін М.З, Сірий О.А, Горбань К.С. Взаємозв'язок робочого процесу пального пристрою на основі струменево-нишевої технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. № 1. С. 63–69.
9. Абдулин М.З., Сірий О.А. Дослідження енергетичних показників струменево-нишевої системи спалювання палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2018. № 12(1288). С. 89–94.
10. Особенности аэродинамики пальных устройств с цилиндричными стабилизаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках / Н. М. Фіалко та ін. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2016. № 252. С. 52–61.

Bietin Yu.O., Abdulin M.Z. FEATURES OF THE ORGANIZATION OF THE FURNACE PROCESS IN LOW-POWER FURNACES OPERATING IN THE LOW-TEMPERATURE RANGE

A review of research on combustion processes of industrial furnaces showed that there are a significant number of them for high-temperature and medium-temperature furnaces. However, there is a lack of understanding of furnace processes in low-temperature low-power furnaces.

For high-temperature furnaces, temperature unevenness of tens of degrees in the furnace space is allowed. At the same time, the permissible level of unevenness is much lower for low-temperature furnaces. This applies to the baking ovens of the food industry, where a low level of temperature occurs with a temperature range from 150 °C to 300 °C. Minimal fluctuations in the average temperature level are also expected. In addition, in low-temperature low-power furnaces, edge effects manifest themselves more clearly. When the furnace space is reduced, the ratio of its dimensions and the geometry of the boundary layers (thermal and aerodynamic) becomes significant compared to the furnace volume of large furnaces. For small furnaces, it is necessary to reduce the geometric parameters of the elements of the burner device (BD) and, accordingly, the diameters of the gas supply holes. This fact affects the aerodynamics of the development of the jet system, the structure of the flow in the BD. And this, in turn, affects the quality of the mixture formation of the fuel mixture and the stabilization of combustion in BD.

Global manufacturers of low-temperature ovens for the food industry faced these problems. The article focuses on low-power furnaces that operate on gaseous fuel in the low temperature range. A study of traditional, common burner devices used in these low-temperature furnaces was conducted. The most important stage of the work was the study of full-time BDs operating in pulse mode. Impulse mode is one of the main modes of operation of furnaces, which appeared as a result of the limited range of operating regulation of BD. Disadvantages of using existing vortex and microflare burning technologies in these cases were revealed.

Key words: jet-niche system, low-temperature furnace, furnace process, vortex-type burner device, pulse mode.