

УДК 621.783.2

**ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧЕЙ ІЗ РЕЗИСТИВНИМ
НАГРІВАННЯМ**

Канд. техн. наук В. П. Нерубацький, д-р техн. наук Е. С. Геворкян,
канд. техн. наук О. Є. Зінченко, аспірант Д. А. Гордієнко, аспірантка О. М. Морозова

**FEATURE OF INCREASE IN ENERGY EFFICIENCY OF HIGH-TEMPERATURE
INDUSTRIAL FURNACES WITH RESISTIVE HEATING**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.)
O. Y. Zinchenko, postgraduate D. A. Hordiienko, postgraduate O. M. Morozova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277882>



***Анотація.** Досліджено технологічні процеси спікання керамічних виробів у високотемпературних електричних печах, що працюють як у захисному середовищі, так і на повітрі. Підібрано алгоритм розрахунку для виконання порівняльних оцінок енергоємності та можливої реалізації, яку можна використовувати при аналізі конкретних ситуацій відносно різних типів керамічних деталей, температура спікання яких перевищує 1400 °С. Отримано фактографію залежностей розподіленої за площею пода потужності від площі пода та питомої потужності від внутрішнього об'єму для гами моделей печей Mobilotherm, призначених для випалу кераміки з максимальною робочою температурою. Виявлено, що додаткове зниження енерговитрат при спіканні в електричних печах на випуск одного виробу та підвищення продуктивності виробництва пов'язано з урівноважуванням теплового балансу печі, зниженням теплових втрат і застосуванням конструкцій печей, у яких можна використовувати залишкове тепло. Проведені дослідження дають змогу припустити, що при розроблених методах розрахунку теплового балансу можна вибрати найбільш оптимальні режими нагрівання печей, рекомендувати найбільш теплостійкі і теплоізолюючі матеріали футеровки.*

***Ключові слова:** високотемпературна піч, керамічний виріб, нагрівач, резистивне нагрівання, спікання, тепловий баланс.*

***Abstract.** For the sintering of ceramic products, high-temperature electric furnaces are used, which work both in a protective environment and in air. In some technological processes, for example, for the production of ceramic carriers for afterburning car exhaust gases based on SiC and Al₂O₃, only air furnaces are used. Silicon carbide (SiC – silicate) heaters and molybdenum disilicide (MoSi₂) are used as resistive heaters in such furnaces. Due to the relatively small resource of their work, it is energetically beneficial to use the residual heat when cooling the furnace. At the same time, there is a significant saving of electricity for heating. The residual heat is largely determined by the thermal insulation of the lining and the correct distribution of the heat balance of the furnace. The speed of temperature rise affects the thermal balance of the furnace in general, and even the speed of cooling of the furnace, which creates additional energy saving opportunities, which reduces the cost of ceramic products.*

The article examines the technological processes of sintering ceramic products in high-temperature electric furnaces. A calculation algorithm was selected for performing comparative assessments of energy intensity and possible implementation, which can be used in the analysis of specific situations regarding different types of ceramic parts, the sintering temperature of which exceeds 1400 °C. A factography of the dependences of the power distributed over the floor area on the floor area and the specific power on the internal volume for a range of models of Mobilotherm furnaces designed for firing ceramics with the maximum operating temperature was obtained. It was found that the additional reduction in energy consumption during sintering in electric furnaces for the production of one product and the increase in production productivity are associated with the balancing of the thermal balance of the furnace, the reduction of heat losses and the use of furnace designs in which residual heat can be used. The conducted studies make it possible to assume that the developed methods of calculating the heat balance allow choosing the most optimal furnace heating modes, recommending the most heat-resistant and heat-insulating lining materials.

Keywords: high temperature furnace, ceramic product, heater, resistive heating, sintering, thermal balance.

Вступ. Печі є основним обладнанням керамічної лабораторії. Вони можуть розрізнятися за розміром від невеликих коробчастих печей з електричним нагріванням, так званих муфельних печей, що можуть поміститися на лаві, до величезних газових печей, використовуваних для плавлення скла. Середніми є печі різних форм і розмірів, призначені для роботи при різних температурах і атмосферах [1].

На цей час для виробництва різних керамічних виробів, наприклад виготовлення стільникових керамічних носіїв автомобільних каталізаторів, в основному використовуються високотемпературні електричні печі з нагрівачами, що працюють у різних середовищах, у тому числі повітряних [2]. Поширення електричних печей порівняно з паливними викликано їхніми суттєвими перевагами:

- отримання дуже великих швидкостей нагрівання і практично будь-яких необхідних температур за рахунок концентрування виділення великої кількості енергії в дуже малих об'ємах (електрична дуга, низькотемпературна плазма, індукційне, електронно-променеве і пряме нагрівання);

- розташування джерела виділення тепла по стінках нагрівальної камери і застосування примусової циркуляції

атмосфери для забезпечення високої рівномірності нагрівання виробів;

- відсутність труднощів під час регулювання потужності, що підводиться, і температури, простота процесу автоматизації регулювання температурного режиму печі;

- легкість включення електричних печей у технологічний потік та автоматичні лінії за рахунок зручності механізації та автоматизації процесів завантаження та вивантаження матеріалів або виробів, що нагріваються, і їх переміщення всередині печі;

- герметизація печей для захисту деталей, що нагріваються, від окиснення захисною атмосферою чи вакуумом або, навпаки, розміщення їх у спеціальній атмосфері для насичення поверхні вуглецем, азотом або іншими речовинами;

- менше забруднення атмосфери, чистота, компактність, зручність обслуговування, покращення умов праці порівняно з паливними печами.

Електричні печі опору поділяються на два типи. Перший – печі опору прямої дії (джоулеве тепло виділяється в самих нагрівальних тілах), другий – печі опору непрямої дії (джоулеве тепло виділяється в нагрівачах і передається тілам випромінюванням, конвекцією або теплопровідністю) [3].

Передача тепла в печі опору непрямой дії може здійснюватися:

- лише випромінюванням (вакуумні печі);
- переважно виборчим випромінюванням (інфрачервоне нагрівання з короткохвильовим або довгохвильовим діапазоном);
- випромінюванням та конвекцією (високо- та середньотемпературні печі);
- конвекцією та випромінюванням (середньо- та низькотемпературні печі);
- конвекцією і теплопровідністю (електродні ванни або ванни з зовнішнім обігрівом).

Визначення основних внутрішніх розмірів робочого простору електричної печі здійснюється виходячи зі штучної продуктивності, часу нагрівання та коефіцієнта завантаження пода аналогічно полум'яним печам.

Внутрішні розміри камери печі мають бути такими, щоб садок не тільки міг розміститися в ній раціонально, з точки зору оптимальних умов для теплопередачі, але її можна було зручно завантажувати і виймати з печі. Крім того, внутрішні розміри камери печі та робочих вікон мають бути такими, щоб у ній можна було провести робочий ремонт. Ці вимоги стосуються не тільки маленьких печей, але і печей зі знімним або легко розбиральним склепінням.

Зовнішні габарити печі визначаються її внутрішніми розмірами і товщиною кладки. Кладка має забезпечити низькі температури кожуха печі (не вище 60 °С при температурі навколишнього повітря 20 °С) і, отже, малі теплові втрати печі.

Час нагрівання заготовки та продуктивність – два тісно пов'язані виробничо-технічні показники будь-якої електроконтактної нагрівальної установки. Зазвичай задається продуктивність установки і в ній уточнюється час нагрівання, інколи ж навпаки: задається час нагрівання і тоді уточнюється продуктивність установки. Але в будь-якому разі час нагрівання (швидкість) має бути розрахований або перевірений, якщо він заданий довільно [4].

Карбідокремнієві електронагрівачі можуть застосовуватися при високих температурах (до 1450 °С на поверхні нагрівачів), у процесі роботи вони не окиснюються, майже не деформуються, не піддаються корозії, легко встановлюються в піч, можуть бути легко замінені без тривалої зупинки печі, мають довший термін експлуатації. Тому карбідокремнієвий електронагрівач широко використовується в різних високотемпературних електричних печах та інших електронагрівальних приладах при виробництві магніту, кераміки, скла, порошкової металургії, машинобудуванні і т. п. До основних факторів, що визначають термін служби електронагрівача, належать температурно-часовий режим роботи електропечі, значення питомої поверхневої потужності, схема з'єднання нагрівачів, спосіб регулювання температури печі, склад пічної атмосфери. Зовнішній вигляд електронагрівача з карбіду кремнію наведено на рис. 1.

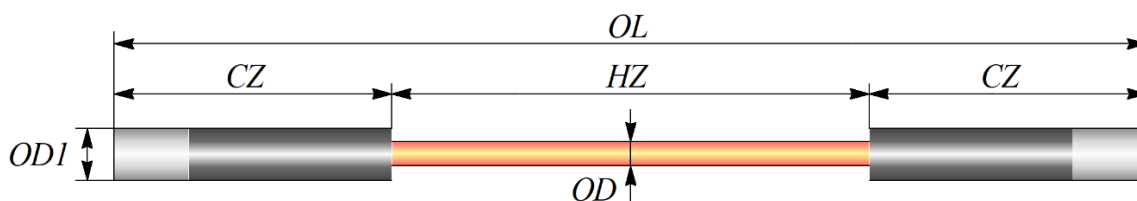


Рис. 1. Зовнішній вигляд електронагрівача з карбіду кремнію:
 OD – зовнішній діаметр, мм; HZ – довжина зони нагрівання, мм;
 CZ – довжина холодного виведення, мм; OL – загальна довжина, мм

Так, електронагрівач типу ED 25/400/400 має такі розміри: $OD = 25$ мм, $HZ = 400$ мм, $CZ = 400$ мм, $OL = 1200$ мм.

Нагрівальні елементи можна вважати чисто резистивними навантаженнями, і до них застосовуються звичайні закони електрики:

$$U = I \cdot R = \sqrt{W} \cdot R = \frac{W}{I}; \quad (1)$$

$$W = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}; \quad (2)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\sqrt{W}}{R} = \frac{W}{U}; \quad (3)$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{W} = \frac{W}{I^2}; \quad (4)$$

де U – напруга, В;

I – сила струму, А;

W – потужність, Вт;

R – опір, Ом.

Для компенсації підвищення електроопору, що неминуче в процесі експлуатації елементів, зазвичай використовується змінна напруга джерел живлення. Величина необхідного резерву напруги залежатиме від темпів «старіння» і передбачуваного терміну служби елементів, але зазвичай становить близько 50...100 % напруги, необхідної для того, щоб дати повну потужність з новими елементами електронагрівання у вихідному стані.

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих у роботах [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [7] подано структуру та оптимізовану електричну систему керування високотемпературною вакуумною піччю опору для спікання карбиду кремнію. Проведено експеримент із

високотемпературного спікання. Як матеріал нагрівача використовувався високочистий графіт. Під час спікання застосовувався низький вакуум та індукція аргоном, щоб захистити графітовий нагрівач від пошкоджень, спричинених випаровуванням. Було прийнято ступінчасту криву нагрівання. Експериментальні результати показали, що піч стабільно працювала при 2500 °С, перехідна температура досягала 2800 °С, а термін служби графітового нагрівача було збільшено.

Також для отримання високої температури необхідно мати компоненти печі, що можуть витримувати такі температури без погіршення якості. Ці

матеріали відомі як вогнетривки. Найбільш поширеним вогнетривким матеріалом в електропечобудуванні, особливо електричних печей опору, є шамот із вмістом глинозему від 30 до 45 % [8].

Оскільки ці печі працюють в основному при температурі, що не перевищує 1300 °С, то вогнетривкі і механічні властивості шамоту цілком задовольняють вимоги до цих печей. В електричних печах бажано застосовувати шамотну цеглу першого сорту з вмістом не менше 38 % Al_2O_3 . Шамотні вироби за своєю вогнетривкістю поділяються на три класи: клас А має вогнетривкість не нижче 1730 °С, клас Б – не нижче 670 °С, клас В – не нижче 1610 °С [9]. Однак робоча температура шамоту набагато нижча, оскільки він втрачає свою механічну міцність при 1300...1400 °С, гранична робоча температура шамоту становить 1350...1450 °С. Шамот має порівняно малий коефіцієнт розширення та добре витримує різні коливання температури [10]. Вироби з нього мають низьку електропровідність, що дає змогу використовувати шамот в електричних печах одночасно як вогнетривкий та електроізоляційний матеріал.

Хоча вуглець зазвичай вважається відновником у процесах пірометалургічної плавки, він також може застосовуватися як вогнетривкий матеріал у системі захисної оболонки печі. Робота [11] присвячена

вогнетривким матеріалам і їхній ролі в конструкції системи захисної оболонки печі. Також розглянуто вуглецевмісні вогнетривкі матеріали та їхнє відповідне застосування, включаючи вогнетривку футеровку системи захисної оболонки печі.

Експлуатація електродугової печі схильна до коливань за основними її показниками, такими як витрати електроенергії, час плавки, вихід сталі та інші. У роботі [12] докладно проаналізовано дані електродугової печі, досліджено витрати нею електроенергії. Добре відомо, що на витрати електроенергії впливають вага і тип брухту, що завантажується, операційні затримки і температура випуску. З іншого боку, можна стверджувати, що вихідні матеріали, такі як вуглець і кисень, також можуть впливати на витрати електроенергії через їхню роль в окиснювально-відновних рівняннях та енергетичний баланс ванни. Тому особлива увага приділяється аналізу відношення вуглецю до кисню під час роботи електродугової печі та подальшому впливу доступності кисню на витрати електроенергії.

У роботі [13] розроблено електричну піч для випалу керамічних виробів і реалізовано її автоматичне керування. Печі (100×50×50 см) можна використовувати для випалу навіть невеликих керамічних виробів, наприклад дрібничок. ПЛК використовується для автоматизації системи. Тепло від печі вимірювалося за допомогою термопар і передавалося на програмовані логічні контролери аналоговим модулем, а тепло печі контролювалося відповідно до отриманих значень тепла. Крім того, відстежувався необхідний ступінь нагрівання та кількість тепла в печі на екрані панелі керування. Зразки продукції, обпалені в печі, довели, що система працює успішно та без проблем.

У роботі [14] проведено дослідження, спрямовані на удосконалення процесів спікання за рахунок заміни існуючих печей старого типу на нові версії цих агрегатів з

удосконаленою конструкцією робочої камери та покращеним регулюванням температури у ній. Оцінено теплову роботу стандартної печі для виробництва, а також нового вдосконаленого типу. Обидва результати порівнюються. Усі отримані дані зіставляються з відповідними їм під час використання стандартних одиниць та умов. Отримані результати дають змогу зробити висновок про те, що заміна обладнання є обґрунтованою і не лише покращує характеристики та якість продукції, а й знижує коливання продуктивності процесу.

У роботі [15] розглядається підхід до реалізації енергоємних технологічних процесів у міських багатопверхових виробничих кластерах на прикладі виробництва керамічних і металокерамічних виробів. Використання сучасних керамічних мікро- та нанопорошків дає змогу перейти на більш енергозберігаючі технології за рахунок зниження температури спікання та скорочення технологічного циклу. Використання запропонованих показників для оцінювання енергоефективності пінокерамічних фільтрів, що спікаються, дає змогу вдосконалити технологічний процес і скоротити час завершення його термічного циклу на 19 %, а також знизити максимальну температуру нагрівання на 20 % до 1350 °С. Прийняття іншої оксидної технологічної альтернативи і використання запропонованої моделі та показників для оцінювання енергоефективності технології спікання пінокерамічних фільтрів дає змогу вибрати менш енергоємне обладнання та заощадити до 40 % електроенергії.

В електричних печах опору динасові вироби застосовуються рідко, а магнезитові зазвичай не застосовуються. У деяких випадках у високотемпературних печах опору застосовуються карборундові вироби для виконання муфелю, жаростійких подових плит та інших елементів печі.

Одним з найпоширеніших теплоізоляційних матеріалів, використовуваних в електрпечобудуванні, є діатоміт і трепек у

вигляді цегли, плит, фасонних виробів і засипки. За цими рекомендаціями складають ескіз печі. Маючи розрахунковий ескіз печі, складають її тепловий баланс, яким обчислюють потужність печі.

Міжнародна енергетична агенція (МЕА) з 1997 року публікує звіти про вплив тенденцій підвищення енергетичної ефективності на кінцеве споживання енергії, відомі як звіти про показники енерго-ефективності. Протягом цього періоду МЕА спільно з іншими фахівцями з енергоефективності очолювало роботу з розроблення показників енергоефективності, а також тісно співпрацювало з країнами та іншими зацікавленими сторонами для покращення збирання енергетичних даних і пов'язаних з ними характеристик кінцевого споживання. Посібники «IEA Energy Statistics Manual» (IEA, 2005), «Oil Crises & Climate Challenges: 30 Years of Energy Use in IEA Countries» (IEA, 2004) та «Energy Use in the New Millennium» (IEA, 2007) є прикладами результатів цієї співпраці.

Як енергоресурс, енергоефективність має унікальний потенціал одночасного сприяння довгостроковій енергетичній безпеці, економічному зростанню і навіть покращенню здоров'я та добробуту людей; зокрема вона є основним інструментом скорочення викидів парникових газів. Заходи з енергоефективності через скорочення або обмеження споживання енергії можуть підвищити стійкість до різноманітних ризиків, таких як зростання і мінливість цін на енергію, навантаження на енергетичну інфраструктуру та збої в системах енергопостачання [16].

«Звіт про ринок енергоефективності» (IEA, 2013) надає велике значення енергоефективності як найбільшому енергетичному ресурсу, так і найважливішій ролі, яку вона відіграє на світовому енергетичному ринку. У звіті зроблено висновок, що інвестиції в енергоефективність забезпечили зменшення споживання енергії, що перевищує обсяги виробництва будь-якого іншого

енергетичного ресурсу в багатьох країнах МЕА. Це вказує на те, що енергоефективність є прихованим паливним резервом і фактично «паливом номер один». Показники енергоефективності використовуються для того, щоб кількісно оцінити, наскільки великий обсяг цього прихованого або «першого» палива.

Для кращого розуміння рушійних сил і потенціалу енергоефективності важливо розробити та підтримувати добре обґрунтовані показники енергоефективності. Однак вибір і розроблення відповідних показників не є досить очевидними. Такі документи, як «Показники енергоефективності: основи формування політики» та «Показники енергоефективності: основи статистики» (IEA, 2014), призначені для забезпечення необхідними інструментами під час процесу початку або поглиблення розроблення детальних показників для підтримки формування результативної політики енергоефективності. Крім того, вони є корисними для фахівців зі статистики та енергоаналітиків, які збирають необхідну інформацію для розроблення показників енергоефективності. Тому, виходячи з показників енергоефективності, має розглядатися експлуатація промислових електропечей, використовуваних для виробництва керамічних і металокерамічних виробів.

Будемо розглядати лише високотемпературні печі з температурою нагрівання, що перевищує 1400 °С, які працюють у повітряному середовищі. У цей час для роботи такого типу печей використовуються в основному два типи нагрівачів, карбідокремневі (SiC) і молібденові дисиліцид (MoSi₂). Недоліком перших є гранична температура 1450 °С, а других – низький ресурс роботи в умовах термоциклювання, хоча температура нагрівання може досягати 1800 °С. Тому гальмування охолодження печі поступовим зниженням електричної потужності зазвичай не потрібно, але навіть при п'ятикратному запасі прийнятій максимально можливій швидкості

охолодження ця стадія в інтенсифікованих технологіях кераміки займає 30...40 % часу нагрівання. Тому частка енерговитрат на охолодження в повному термічному циклі якщо і не нульова, то дуже мала величина. Скоротити допоміжний час на розвантаження-завантаження печі в повному робочому циклі виробництва кераміки можна з використанням конструкцій з рухомим дном, наприклад печей Mobilotherm. На відміну від звичайних камерних печей, у них завантаження дна печі (висувного пода) здійснюється поза піччю.

Отже, питання використання залишкового тепла печей від режиму охолодження до кінця і подальше удосконалення процесів спікання керамічних виробів є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення енергоефективності високотемпературних промислових печей із резистивним нагріванням, що дасть можливість значно

скоротити час технологічного процесу та заощадити електроспоживання.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- подати особливості та можливості печей у взаємозв'язку зі структурно-параметричними характеристиками технологічних регламентів;
- запропонувати методи розрахунку теплового балансу, що дали б змогу вибрати найбільш оптимальні режими нагрівання печей.

Основна частина дослідження

Матеріали та методи. Як вироби для експерименту використовувалися керамічні стільникові блоки з оксиду алюмінію (Al_2O_3) і карбїду кремнію (SiC) з розмірами $D = 100$ мм, висотою $h = 50$ мм.

Дослідження проводили на електричних печах Mobilotherm (Німеччина). Основні характеристики моделей печей європейської торгової марки Mobilotherm для випалу кераміки з максимальною робочою температурою $T = 1400$ °C наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики гами моделей печей

Модель	Внутрішні розміри, мм	Потужність, кВт
W1000/14	800×1600×800	69
W1500/14	900×1900×900	99
W2200/14	1000×2200×1000	126
W3300/14	1000×2800×1200	168
W5000/14	1000×3600×1400	220
W7500/14	1000×5400×1400	336

Скорочення обсягу непродуктивного часу експлуатації печі забезпечується за рахунок того, що для кожної печі одночасно задіюють два поди: коли один з них знаходиться в печі, інший може навантажуватися. Оскільки для обміну висувних подів необхідний досить короткий час, практично не залежний від обсягу навантаження пода, використання системи висувних подів означає відсутність простою печі. Такий механізм використання системи

висувних подів завдяки скороченню часу на розвантаження печі дає змогу також більшою мірою використовувати залишкове тепло, що особливо проявляється при експлуатації великих печей з повним завантаженням. Печі стандартного виконання можна відкривати при температурі приблизно до 500 °C, якщо це необхідно робити при більш високих температурах, то може використовуватися піч з підйомними дверима і рухомим рейковим подом (рис. 2).

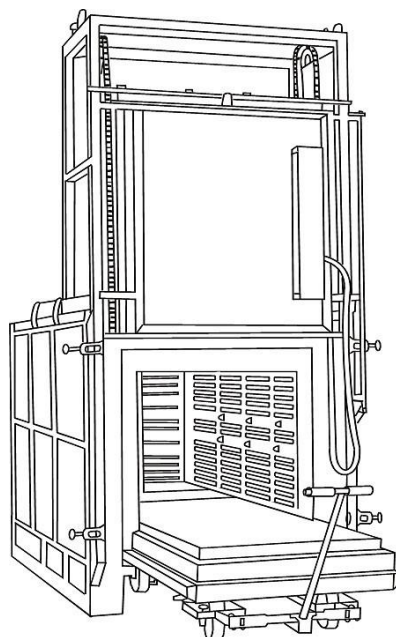


Рис. 2. Піч Mobilotherm W3300/G з висувним подом

Розрахунок часу нагрівання може бути виконаний двома способами: розрахунковим шляхом і за експериментальними даними, наведеними в літературних джерелах. У першому випадку необхідно скористатися рівнянням теплового балансу [17]

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (5)$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється електричним струмом під час проходження по заготовці (деталі);

Q_1 – тепло, витрачене на нагрівання заготовки (деталі);

Q_2 – теплові втрати в навколишній простір.

$$Q = I_{сер}^2 \cdot R_3 \cdot \tau; \quad (6)$$

$$Q_1 = c \cdot G \cdot (t_k - t_n); \quad (7)$$

$$Q_2 = q_{\Sigma} \cdot F \cdot \tau. \quad (8)$$

Розв'язуючи рівняння теплового балансу відносно часу нагрівання, отримаємо [17]

$$\tau = \frac{c \cdot G \cdot (t_k - t_n)}{I_{сер}^2 \cdot R - q_{\Sigma} \cdot F} \quad (9)$$

де q_{Σ} – сумарні теплові втрати з заготовки в навколишній простір, що складаються з втрат на випромінювання q_m^e , конвекцію q_m^k і теплопровідність (через контакти) q_m^m .

$$q_m^e = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – відносний коефіцієнт випромінювання, що враховує відбивні властивості поверхні заготовки (для окисненої сталі $\varepsilon = 0,8 \dots 0,9$, окисненої міді $\varepsilon = 0,7$, латуні $\varepsilon = 0,6$);

T_3 – температура поверхні заготовки;

T_0 – температура навколишнього повітря.

$$q_m^k = \alpha_k \cdot (t_z - t_0) \quad (11)$$

Теплові втрати теплопровідністю визначаються за кількістю і температурою води, що відводиться [17]:

$$q_m^m = g \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{860}, \quad (12)$$

де g – годинні витрати води на один контакт (25...50 дм³);

Δt – температурний перепад у воді, що охолоджує контакти (близько 30...40 °С).

Якщо знехтувати тепловими втратами (що практично припустимо), то рівняння (9) набуває вигляду

$$\tau = \frac{c \cdot G \cdot (t_k - t_n)}{I_{cep}^2 \cdot R} \quad (13)$$

Тоді для будь-якого розрахункового інтервалу час нагрівання можна обчислити як [17]

$$\tau_i = \frac{c \cdot G}{\alpha_i \cdot F} \cdot \ln \frac{I_{zi} \cdot R - \alpha_i \cdot F \cdot (t_{ni} - t_0)}{I_{ki} \cdot R - \alpha_i \cdot F \cdot (t_{ki} - t_0)}, \quad (14)$$

де τ_i – тривалість нагрівання протягом інтервалу;

α_i – середній коефіцієнт тепловіддачі в інтервалі температур $t_{ki} - t_{ni}$ для температури $(t_{ki} - t_{ni}) / 2$;

t_{ni}, t_{ki} – температури заготовки на початку та наприкінці інтервалу;

I_i – середнє значення струму в інтервалі для $t_{cep_i} = (t_{ki} + t_{ni}) / 2$;

R_{zi} – активний опір заготовки при температурі $t_{cep_i} = (t_{ki} + t_{ni}) / 2$.

Повний час нагрівання

$$\tau_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_i + \dots + \tau_k. \quad (15)$$

Час циклу можна отримати, додавши час завантаження та вивантаження установки τ_6 :

$$\tau_{ц} = \tau_n + \tau_6. \quad (16)$$

Тепловий ККД можна визначити теоретично, враховуючи види втрат і виходячи з теоретичного мінімуму енергії, необхідного для нагрівання цієї маси металу деталі, що нагрівається до відповідної граничної температури.

Слід зазначити, що опір нагрівальних елементів збільшується приблизно на 5...6 % кожні 1000 год при безперервному режимі на чистому повітрі за температури 1400 °С, а при температурі 1000 °С – на 3 % кожні 1000 год. Необхідно брати до уваги, що будь-які незначні зміни в умовах експлуатації можуть вплинути на темпи «старіння» [18]. Карбідокремнієві елементи не мають спеціальних номінальних значень у ватах, і номінальна потужність – це функціональна залежність необхідної робочої температури, робочої атмосфери та режиму експлуатації. Навантаження, Вт/см², на поверхню обчислюється за рахунок поділу потужності кожного елемента на площу поверхні «гарячої» зони. Оскільки навантаження на поверхню безпосередньо залежить від температури елемента, необхідно вибрати найменше навантаження на одиницю потужності для оптимального терміну служби елемента, як правило, це 3...8 Вт/см².

Результати та обговорення.

Встановлено, що зі збільшенням внутрішніх розмірів пічної камери відношення максимальної споживаної потужності N_{max} (кВт) до площі пода печі S_f (м²) або розподілена по площі пода потужність W_s

(кВт/м²) відносно невеликою мірою змінюється зі зміною площі пода. Як впливає з рис. 3, зі зміною площі пода приблизно вдвічі навколо середнього

значення у наведеній гамі моделей печей Mobilotherm (табл. 1), яким приймемо відповідне моделі W3300/14 ($S_f = 2,8 \text{ м}^2$), величина W_s змінюється в межах 10 %.

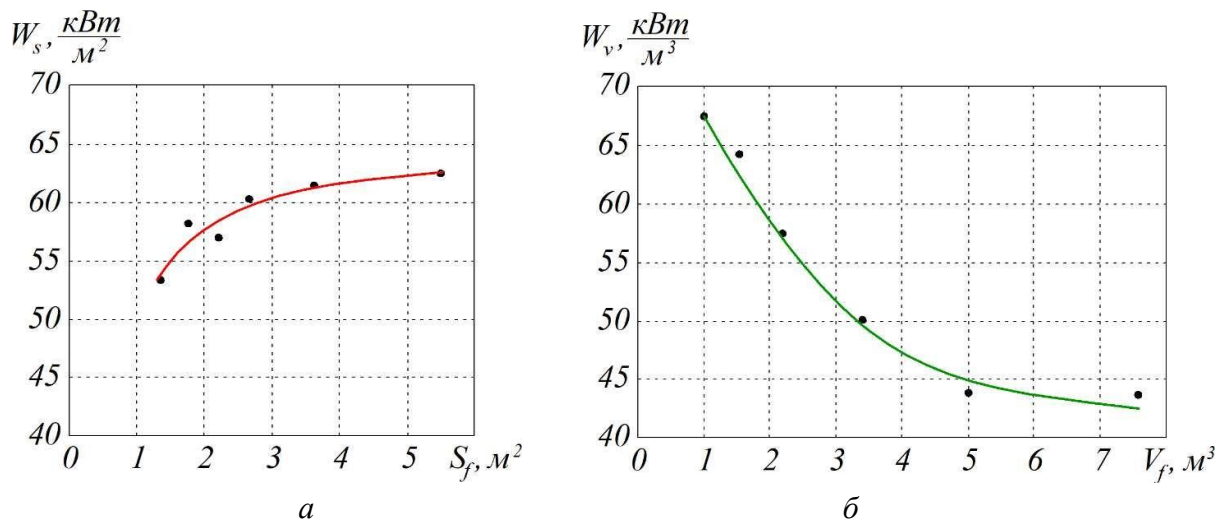


Рис. 3. Фактографія залежностей розподіленої за площею пода потужності W_s від площі пода $S_f(a)$ і питомої потужності W_v від внутрішнього об'єму $V_f(b)$ для гами моделей печей Mobilotherm, призначених для випалу кераміки з максимальною робочою температурою $T_{\max} = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

Тому при одноярусному завантаженні печі використання цієї зміни на користь економії енерговитрат, що припадають на одиницю та весь випуск продукції, відносно малозначуще. Наприклад, при виготовленні партії виробів габаритні розміри становили $D = 100 \text{ мм}$, $h = 50 \text{ мм}$ при внутрішніх розмірах пічної лабораторної камери $400 \times 400 \times 450 \text{ мм}^2$ і призначені для виготовлення в першу чергу стільникових керамічних носіїв каталізаторів автомобілів та інших виробів. Якби ця партія виготовлялася в печах Mobilotherm, то при переході від моделі W1000/14 до моделі W7500/14 при тому самому коефіцієнті використання площі пода в перерахунку на один виріб, що і в лабораторних умовах ($k_{us} \approx 0,9$), випуск деталей за один термічний цикл печі збільшується з 10 до 50 виробів, при зростанні сумарних енерговитрат майже в п'ять разів або майже в 1,5 раза в перерахунку на один виріб.

З іншого боку, зі збільшенням внутрішніх розмірів пічної камери, тобто об'єму печі, відношення максимальної споживаної потужності N_{\max} (кВт) до робочого об'єму печі V_f (м³), або питома потужність W_v (кВт/м³), змінюється помітно більшою мірою в межах аналізованої гами моделей печей (рис. 3). Зі збільшенням робочого об'єму печі з $V_f = 1,024 \text{ м}^3$ до $V_f = 7,56 \text{ м}^3$, або приблизно в 7,4 раза, питома потужність знижується більш ніж у 1,5 раза, що дає змогу в деяких випадках розглядати питання доцільності багоярусного завантаження печі, особливо зі змінними висувними подами, якщо розміри виробу і конструкція форми, що містить його, дають змогу здійснювати таке завантаження.

Так, при вирішенні виробничого завдання, розглянутого вище та відповідного, приймаючи значення коефіцієнтів використання площі та висоти

пода в перерахунку на один виріб відповідно $k_{us} = 0,9$ і $k_{uh} = 0,5$, у межах аналізованої гами моделей печей (табл. 1) можна збільшити випуск, наприклад стільникових носіїв каталізаторів за один термічний цикл печі з 64 до 364 виробів, або приблизно на 470 %, причому зменшення енерговитрат у перерахунку на один виріб становить близько 15 %. Разом з розмірами робочої камери важливі конструктивні

особливості агрегату випалу не менше можуть визначати обсяг споживаної енергії.

У табл. 2 наведено результати узагальнення деяких рекламних даних сучасних виробників термічного обладнання про техніко-економічні показники різних типів печей, рекомендованих для випалу кераміки з максимальною робочою температурою $T_{max} = 1400$ °С.

Таблиця 2

Відносне середнє питоме споживання енергії різними агрегатами

Агрегат	Питоме споживання, %
Піч з рухомим подом	100
Звичайна тунельна піч	93
Піч з верхніми та нижніми пальниками, візками з легкою вогнетривкою футеровкою для прискороного випалу	61
Піч для прискороного випалу з верхніми пальниками та рухомим подом	50
Роликова піч	31

З поданого випливає, що зниження енергоспоживання при випалі можна досягти ускладненням конструкції печей, а отже, підвищенням їхньої відпускнуої ціни та непродуктивних експлуатаційних витрат.

З точки зору споживача, економічна доцільність використання такого прогресивного, але дорогого обладнання виникає при досить великих обсягах замовлень і сталому попиті. До того ж з використанням обладнання підвищеної складності виникають додаткові питання резервування надійності технологічних систем, що включають його, вирішення яких також пов'язане з додатковими витратами, знову ж таки тим більше виправданими, чим більші і стабільніші масштаби виробництва.

Слід зазначити, що дещо вищий рівень питомого споживання енергії при використанні печей з рухомим подом без додаткових верхніх пальників порівняно зі звичайними тунельними печами завдяки можливості більш ефективного використання залишкового тепла, як це було

зазначено раніше, певною мірою компенсується в загальній структурі енерговитрат потокового виробництва (до того ж більш продуктивного при використанні схеми обміну висувними подами при розвантаженні печі).

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– при проєктуванні та прогнозуванні нових і реконструйованих керамічних виробництв рекомендується, зокрема, звертати увагу на облік конструктивних, геометричних, температурних та енергетичних особливостей і можливостей печей, що розглядаються у взаємозв'язку зі структурно-параметричними характеристиками технологічних регламентів, що освоюються. Для апріорного порівняльного оцінювання енергоємності та принципових технологічних поліваріантів і технічного середовища їхньої можливої реалізації необхідна розрахункова схема, що буде

використана при аналізі конкретних ситуацій відносно різних типів керамічних деталей, температура спікання яких перевищує 1400 °С;

– на підставі досліджень енергозберігаючих продуктивних технологій для виготовлення стільникових керамічних носіїв, а також з урахуванням світових тенденцій удосконалення техніки і технологій аналогічного застосування можна стверджувати, що додаткове зниження енерговитрат при спіканні в

електричних печах на випуск одного виробу та підвищення продуктивності виробництва пов'язано з урівноважуванням теплового балансу печі, зниженням теплових втрат і застосуванням конструкцій печей, у яких можна використовувати залишкове тепло. Розглянуті методи розрахунку теплового балансу дають змогу вибрати найбільш оптимальні режими нагрівання печей, рекомендувати найбільш теплостійкі і теплоізолюючі матеріали футеровки.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Використання нетрадиційних методів отримання нанопорошків і спікання при розробці модифікованої муліто-ZrO₂ кераміки стійкої до термоудару» (державний реєстраційний номер 0121U1094401).

Список використаних джерел

1. Furnaces. In: *Ceramic Materials*. Springer. New York, NY. 2007. P. 139–153. DOI: 10.1007/978-0-387-46271-4_9.
2. Zhang Y., Li Q., Zhou H. *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*. Academic Press. New York, NY. 2016.
3. Электрические печи сопротивления и дуговые печи: учеб. для техникумов / М. Б. Гутман, Л. С. Кацевич, М. С. Лейканд и др.; под ред. М. Б. Гутмана. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
4. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник / Е. С. Геворкян, Г. Д. Семченко, Л. А. Тимофеева, В. П. Нерубацький. Харків: «Діса плюс», 2015. 344 с.
5. Опанування процесів синтезу оксидних сполук з застосуванням потужного джерела швидкого нагріву вихідних інгредієнтів / В. О. Чишкала, С. В. Литовченко, Е. С. Геворкян та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 118–128. DOI: 10.18664/1994-7852.196.2021.242226.
6. Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Gutsalenko Y., Morozova O. Determining the influence of ultra-dispersed aluminum nitride impurities on the structure and physical-mechanical properties of tool ceramics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, No. 12 (114). P. 40–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245938.
7. Xiao J., Jiang S. Experimental study of high temperature vacuum furnace for sintering SiC ceramics. *Jingangshi yu Moliao Moju Gongcheng / Diamond and Abrasives Engineering*. 2007. Vol. 2. P. 50–52.
8. Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. Москва: Металлургия, 1979. 247 с.
9. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: учеб. для вузов / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др.; под ред. А. Д. Свенчанского. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоиздат, 1981. 296 с.
10. Rovnanik P., Safrankova K. Thermal Behaviour of Metakaolin / Fly Ash Geopolymers with Chamotte Aggregate. *Materials*. 2016. Vol. 9 (7). P. 535. DOI: 10.3390/ma9070535.

11. Thethwayo B. M., Steenkamp J. D. A review of carbon-based refractory materials and their applications. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol. 120 (11). P. 641–650. DOI: 10.17159/2411-9717/1011/2020.
12. Logar V., Skrjanc I. The Influence of Electric-Arc-Furnace Input Feeds on its Electrical Energy Consumption. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021. Vol. 7. P. 1013–1026. DOI: 10.1007/s40831-021-00390-y.
13. Bayindir R. Design and construction of an electrical furnace to fire ceramic product. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2007. Vol. 66 (2). P. 135–140.
14. Gankov A., Stanev R. Improvement of sintering process of platinum layers in electrical furnaces. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52, No. 2. P. 346–354.
15. Gevorkyan E., Chmiel J., Wiśnicki B., Dzhuguryan T., Rucki M., Nerubatskyi V. Smart sustainable production management for city multifloor manufacturing clusters: An energy efficient approach to the choice of ceramic filter sintering technology. *Energies*. 2022. Vol. 15, Is. 17. P. 6443. DOI: 10.3390/en15176443.
16. Про енергетичну ефективність: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. Чинний. 2022. № 2. Ст. 8.
17. Логачев М. В., Иваницкий Н. И., Давидович Л. М. Расчёты нагревательных устройств: в 3 ч. Минск: БНТУ, 2010. Ч. 2. Расчёты электрических печей и установок. 131 с.
18. Remanufacturing and Advanced Machining Processes for New Materials and Components / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, V. P. Nerubatskyi, W. Żurowski, Z. Siemiątkowski, D. Morozow, A. G. Kharatyan. Taylor & Francis, 2022. 204 p.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Геворкян Едвін Спартаківич, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16.

E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Зінченко Олена Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 790-37-95.

E-mail: lena.zinchenko15@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2294-9527.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95.

E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Gevorkyan Edwin Spartakovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com.

ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Zinchenko Olena Yevhenivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (067) 790-37-95.

E-mail: lena.zinchenko15@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2294-9527.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Статтю прийнято 20.03.2023 р.