

УДК 669.041

В.Ю. Зінченко, доцент, канд. техн. наук
 В.І. Іванов, ст. науковий співробітник
 О.І. Чепрасов, професор, канд. техн. наук
 Ю.М. Каюков, доцент, канд. техн. наук

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ КАМЕРНОГО ТИПУ

Запорізька державна інженерна академія

Выполнен анализ современного состояния математической оптимизации тепловой работы нагревательных печей камерного типа. Отмечены сложности в системе «греющие газы - кладка печи - металл», связанные с обеспечением равномерного подвода тепловой энергии к поверхности нагреваемого металла. Решением такой проблемы может быть усовершенствование тепловых схем отопления печей указанного типа, а также методов сжигания газообразного топлива, и в частности, как одного из его вариантов – сжигание топлива в стадийном режиме

Ключевые слова: нагревательные печи камерного типа, металл, равномерность нагрева, задачи математической оптимизации, современное состояние, анализ

Виконано аналіз сучасного стану задачі математичної оптимізації теплової роботи нагрівальних печей камерного типу. Відмічено складнощі у системі «гріючі газы - кладка печі - метал», які пов'язано із забезпеченням рівномірного підведення теплової енергії до поверхні металу, що нагрівають. Вирішенням такої проблеми може бути удосконалення теплових схем опалювання печей зазначеного типу, а також методів спалювання газоподібного палива, та зокрема, як одного з його варіантів – спалювання палива за стадійним режимом.

Ключові слова: нагрівальні печі камерного типу, метал, рівномірність нагрівання, задачі математичної оптимізації, сучасний стан, аналіз

An analysis of modern condition for mathematical optimization task of heat work for heating furnaces of chamber type is carried out. The complications in the system «heating gases - refractory of furnace - metal», related with providing of heat energy admission even to the surface of the heated metal are marked. By the decision of such problem may to be an improvement of heat charts for heating furnaces of mentioned type, and also methods of gaseous fuel incineration, in particular, and as one of its variants is incineration of fuel in the phase mode.

Keywords: heating furnaces of chamber type, metal, evenness of heating, tasks of mathematical optimization, modern condition, analysis

Нагрівальні печі камерного типу є головними споживачами газоподібного палива як у металургійній, так і машинобудівній галузях промисловості. Проблема енергозбереження для таких печей є багатоплановою задачею, що, за інших рівних умов, вирішують раціональним вибиранням компоненту газоподібного палива, а також оптимізацією їх газодинамічного, теплового та температурного режимів.

Для печей зазначеного типу широко використовують рециркуляцію газових потоків [1], а також комбінування суміші декількох компонентів палива [2], при цьому температурні режими задають не лише з позиції забезпечення заданої температури поверхні металу та рівномірності її розподілу (виходячи з термічної масивності металу), так із урахуванням теплофізичних перетворень у металі під час його нагрівання. Температурні режими нерідко є багатоступінчастими

ми з обмеженням як швидкості нагрівання металу, так і його охолодження. Через змінювання умов зовнішнього передавання теплоти метал, що нагрівають, за термічною масивністю найчастіше відносять до перехідної зони критерію Біо (Bi), що підвищує вимоги до точності забезпечення режимів його обробки.

За роботи нагрівальних печей камерного типу виникають складнощі, пов'язані із забезпеченням рівномірного підведення теплоти до поверхні металу, тобто процес вирівнювання температури металу в обсязі печі відбувається, коли значення теплового потоку, якого підводять, безперервно зменшується, що обумовлено необхідністю підтримки заданого постійного значення температури поверхні металу. До кінця періоду його нагрівання під час зниження загальної витрати гріючих газів та, як наслідок, і швидкості їх руху, відбувається зменшення значення загального коефіцієнта передавання теплоти, що призводить до ускладнення організації процесу

нагрівання металу, тобто управління зазначеним процесом слід здійснювати для ділянок садки металу, які є найбільше нагрітими, в той же час загальна тривалість нагрівання металу визначається терміном збільшення рівня температури для відстаючих ділянок садки. Викладання загальних положень теорії нагрівальних печей камерного типу, а також методів їх розрахунків, подано у роботах [3-9].

Незважаючи на технологічні, конструктивні та інші відмінності нагрівальних печей камерного типу на сьогодні визначено єдині підходи до організації та дослідження їх теплової роботи, а також типові системи автоматичного контролю й регулювання.

До основи практично всіх математичних моделей нагрівання термічно масивних тіл покладено класичне рівняння теплопровідності у вигляді диференціального рівняння з частинними похідними [10].

Моделюванням теплової роботи камерних печей для нагрівання зливків перед прокаткою або куванням у роботі [11] визначали залежність продуктивності, питомої витрати палива, питомого виходу термічних оксидів азоту, втрат металу з окалиною від теплової потужності печі. Як критерій оптимальності використовували комплексний енергоекономічний показник роботи печі.

Чисельні методи вирішення нелінійних задач теплопровідності є менш наочними [12,13], але більш адаптованими для виконання їх на ЕОМ широкого класу.

Поява численних методів моделювання теплової роботи печей зазначеного типу має потребу обґрунтовувати вибір того або іншого методу розрахунків, виходячи з трудомісткості та точності одержаного вирішення.

Суть чисельно-аналітичного методу вирішення диференціальних рівнянь теплопровідності, розробленого в ІТЕУ групою вчених на чолі з Л.О. Бровкіним [14], полягала у заміні шуканого поля температури на суму елементарних теплових полів (суперпозицій), що взято з певними ваговими коефіцієнтами та змінюються у просторі та за часом. Елементарні поля розраховують за аналітичним вирішенням задачі теплопровідності та подають як графіки та таблиці. Урахування залежності теплофізичних параметрів металу від температури здійснюють методом послідовних наближень. Зазначений метод використовують під час вирішення пов'язаних задач теплообміну в робочому обсязі печей [15-17], де не потрібна детальна інформація про по-

ле температури, а важливою є швидкість розрахунків.

Точне вирішення такої задачі, а також наближене вирішення у вигляді, зручному для інженерних розрахунків, подано у роботі [10]. Аналітичне вирішення виконано дедуктивним методом, відповідно до якого спочатку за допомогою інтеграла Дюамеля знаходять загальні вирішення рівняння за граничних умов третього роду, де температуру гріючого газу задають у вигляді довільної функції часу. Як результат розрахунків одержують інтегрально-диференціальне рівняння, яке вирішують методом інтегрального перетворення Лапласа відносно температури гріючих газів.

У публікації [18] подано оптимальний за вартістю суміші газоподібного палива режим нагрівання з використанням двох його компонентів. Встановлено, що компоненти палива слід вибирати виходячи зі ступенів температурно-часового режиму, а також вирішено задачу вибирання теплотворної властивості газоподібного палива.

У роботах [19,20] визначено оптимальні режими роботи нагрівальних печей камерного типу за економічними критеріями, у роботі [21] розглянуто управління їх тепловою роботою з позиції забезпечення заданої точності нагрівання. У задачах оптимізації за часом нагрівання (швидкісне нагрівання) одержано ступінчасті теплові режими, тобто релейні закони змінювання теплового навантаження, які у повній мірі відповідають теоремі Фельдбаума про «*n*» інтервали управління [22].

Перші роботи щодо оптимізації виконано на основі моделей у вигляді звичайних диференціальних рівнянь. Поширення математичних методів оптимізації – методу Л.С. Понтрягіна [23] та динамічного програмування Беллмана [24], – на системи, що описуються рівнянням у частинних похідних, призводить до такого ж за виглядом оптимального вирішення.

У роботі [25] запропоновано математичну модель оптимізації режимних параметрів нагрівальної печі камерного типу як вирішення задачі теплообміну в системі «гріючі гази - кладка печі - метал». Садку металу розглядають як пористе тіло з ефективними теплофізичними параметрами. Під час вирішення задачі оптимізації коефіцієнт передавання теплоти розраховують у нульовому наближенні, а потім уточнюють під час обчислень. Складні розрахунки полів температури для садки металу та кладки печі призводять до визначення тривалості періодів нагрівання та витримки садки металу.

Для вирішення прикладних задач оптимізації запропоновано спрощений алгоритм розрахунків пов'язаного теплообміну в нагрівальних печах камерного типу з урахуванням неізотермічності обсягу, що нагрівають [26], згідно якому як і раніше необхідно вирішувати систему нелінійних диференціальних рівнянь з використанням простої ітерації.

Нагрівання термічно тонких тіл за нелінійних граничних умов із урахуванням втрат теплоти через кладку печі розглянуто у роботі [27]. Невизначеність теплофізичних параметрів металу, умовність вживаних механізмів передавання теплоти знижують практичну цінність одержаних результатів, які використовують тільки для якісних досліджень.

Використання чисельно-аналітичних методів вирішення задач оптимізації за реальним масштабом часу не можна вважати задовільним, оскільки зазначені методи засновано на багатократному вирішенні початкової та пов'язаної системи рівнянь і потребують наявності значного обсягу інформації (в основному довідкового характеру). Знак погрішності розрахунків теплового та температурного режимів виявляється невідомим, тому під час практичної реалізації необхідно коригувати тривалість процесу нагрівання металу, в у бік збільшення тривалості періоду його витримки.

За постановки задачі математичної оптимізації нагрівання металу набувають чинності різного роду обмеження як на впливи, що управляють, так і на координати об'єкту у вигляді ряду нерівностей. Найчастіше обмежують значення швидкості нагрівання (охолодження) металу, як з позиції зменшення внутрішніх напружень, так і змінювання кристалізаційних перетворень [28]. Відомо, що під час термічного стиснення та розширення металу відбуваються фазові перетворення, кристалізація, змінювання хімічного складу поверхневих шарів та його питомого об'єму, які призводять до виникнення внутрішніх напружень (макронапружень) [29].

Під час оптимізації управління нагріванням у печах зазначеного типу нерідко вводять обмеження не лише на теплову потужність, але і на якість спалювання газоподібного палива, тобто на склад горючих газів. Відомо, що наявність кисню у робочому обсязі печі призводить до вигару металу під час протікання в ньому процесів циндроутворення та зневуглицювання. Експериментально встановлено, що визначальним для таких процесів служить не стільки вміст кисню, скільки час перебування металу в печі за підвищеної температури. Вважають, що зневуглицю-

вання під час замало окисаційного нагрівання з підвищенням часу обробки залишається на тому ж рівні, що і під час звичайного нагрівання. Нагрівання сталі з глибиною зневуглицюваного шару, що регламентують, слід здійснювати в атмосфері з високим вуглецевим потенціалом за коефіцієнта витрати повітря $\alpha < 0,4$. Вважають, що оптимальний вміст кисню в атмосфері робочого обсягу печі складає не більше 1,0 %. Вводять також обмеження на максимальне та мінімальне теплове навантаження печі з урахуванням її продуктивності, типу пальників та їх діапазону регулювання, а також пропускної спроможності газовідвідного тракту.

Під час управління тепловою потужністю нагрівальних печей камерного типу зниження витрати газоподібного палива супроводжується зменшенням кількості продуктів горіння, а, отже й об'ємної витрати горючих газів, що беруть участь у процесі теплообміну. Одночасно до кінця процесу нагрівання металу знижується рівень температурного натиску на його поверхню, а також відбувається зменшення значення коефіцієнта загальної тепловіддачі, що призводить до ускладнення організації процесу нагрівання за вище поданої умови.

Тому управління тепловою роботою печей зазначеного типу полягає в організації цілеспрямованого впливу на теплообмінні процеси, які відбуваються у системі «горючі гази - кладка печі - метал». Передавання теплоти від горючих газів до металу, що нагрівають, здійснюється за рахунок зовнішнього теплообміну, який визначається як рівнем температури зазначених газів, так і швидкістю їх руху в печі. Під час підвищення швидкості руху горючих газів у печах даного типу відбувається вирівнювання поля температури щодо поперечного перерізу потоку, що є рівносильним підвищенню їх температури [2] та, як наслідок, управління тепловою роботою таких печей зводиться до управління зовнішнім теплообміном змінюванням їх теплового навантаження.

Проблеми допалювання горючих компонентів палива у робочому обсязі нагрівальних печей, які мають місце за стадійним спалюванням, розглянуто у роботі [30]. Встановлено, що для високотемпературних печей найраціональнішим є використання кисню як оксидатора, щоб уникнути зниження калориметричної температури палива через втрати теплоти на нагрівання холодного азоту, що входить до складу повітря.

Висновки

1. Аналіз сучасного стану теплової роботи нагрівальних печей камерного типу свідчить про

невідповідність у разі випадків їх теплової можливості та технологічних вимог до якості нагрівання металу. Найбільш перспективним вирішенням такої проблеми є вдосконалення теплових схем опалювання печей і методів спалювання газоподібного палива.

2. Проблемою розробки моделей нагрівання печей зазначеного типу є невизначеність ідентифікації, а також завдання температурної залежності теплофізичних параметрів металу та коефіцієнта загальної тепловіддачі, які не адаптуються під час управління тепловою роботою печей.

3. Встановлено, що процес вирівнювання рівня температури у робочому обсязі нагрівальної печі камерного типу відбувається за безперервним зниженням теплових потоків, котрі надходять до поверхні металу, а також зменшенням витрати газоподібного палива, що, в свою чергу, призводить до зниження кількості гріючих газів, які беруть участь у процесі теплообміну. Вирішення зазначеної проблеми є можливим із застосуванням рециркуляції продуктів горіння, що ставить вимогу суттєвого змінювання конструкції пічних агрегатів, а також методу стадійного спалювання газоподібного палива.

Бібліографічний список

1. **Пуговкин, А. У.** Рециркуляционные пламенные печи. Расчет и конструирование [Текст] / А. У. Пуговкин. – 2-е изд. испр. и доп. – Л. : Машиностроение, 1975. – 200 с. – Библиогр.: с. 197-198. – 3200 экз.
2. **Ревун, М. П.** Автоматическое управление нагревом металла [Текст] / М.П. Ревун, В. И. Гранковский. – Киев : Техніка, 1973. – 140 с. – Библиогр.: с. 136-138. – 1500 экз.
3. **Кривандин, В. А.** Metallургические печи [Текст] : учеб. пособие / В. А. Кривандин, В. Л. Марков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Metallургия, 1977. – 463 с. – Библиография в конце каждого раздела. – 17200 экз.
4. **Мастрюков, Б. С.** Теплофизика металлургических процессов [Текст] : учеб. пособие / Б. С. Мастрюков, Т. С. Сборщиков. – М. : Metallургия, 1993. – 320 с. – Библиография в конце каждого раздела. – 2500 экз. – ISBN 5-229-00709-5.
5. **Розенгарт, Ю. И.** Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах [Текст] // Ю. И. Розенгарт, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Киев-Донецк : Выща школа, Головное изд-во, 1986. – 296 с. – Библиогр.: с. 287-288. – 2000 экз.
6. **Губинский, В. И.** Теория пламенных печей [Текст] / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с. – Библиогр.: с. 57-58, 252. – 1000 экз. – ISBN 3-127-026472.
7. **Лисиенко, В. Г.** Теплофизика металлургических процессов [Текст] : учеб. пособие / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. – М. : Metallургия, 1982. – 239 с. – Библиогр.: с. 238-239. – 4600 экз.
8. **Несенчук, А. П.** Пламенные печи для нагрева и термообработки [Текст] : учеб. пособие / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин, И. И. Кальтман. – Минск : Высшая школа. 1973. – 350 с. – Библиогр.: с. 234-238. – 2000 экз.
9. **Тайц, Н. Ю.** Технология нагрева стали [Текст] / Н.Ю. Тайц. – 2-е изд. доп. и испр. – М. : Metallургия, 1962. – 567 с. – Библиогр.: с. 562-567. – 5200 экз.
10. **Беляев, Н. М.** Основы теплопередачи [Текст] : учеб. пособие / Н. М. Беляев. – Киев : Вища школа, 1989. – 342 с. – Библиогр.: с. 336-338. – 6000 экз. – ISBN 5-11-000186-3.
11. **Котляревский, Е. М.** Применение математического моделирования процессов нагрева и прокатки слитков при разработке рациональной технологии нагрева металла [Текст] / Е. М. Котляревский, А. В. Баженов // Известия Вузов. Черная металлургия. 1987. – № 6. – С. 120-126. – Библиогр.: с. 126.
12. **Рихтмайер, Р.** Разностные методы решения краевых задач [Текст] / Р. Рихтмайер, К. Мортон. ; пер. с англ. Б. М. Бурдака ; под ред. А. Д. Горбунова. – М. : Мир, 1972. – 420 с. – Библиогр.: с. 381-413. – 3500 экз.
13. **Цой, П. В.** Методы расчета задач тепломассопереноса [Текст] / П. В. Цой. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с. – Библиогр.: с. 404-410. – 4300 экз.
14. **Бровкин, Л. А.** Математическое моделирование промышленных печей [Текст] / учеб. пособие / Л. А. Бровкин, Л. С. Крылова, А. К. Соколов. – Иваново : Изд-во ИЭИ, 1984. – 89 с. – Библиогр.: с. 78-79. – 100 экз.
15. **Ольшанский, В. М.** Об одном приближенном решении задачи нагрева массивных тел одновременно излучением и конвекцией [Текст] / В. М. Ольшанский // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 1. – С. 121-124. – Библиогр.: с. 124.
16. **Гузов, Л. А.** Нагрев тонкого тела с минимальным расходом топлива [Текст] / Л. А. Гузов, В. М. Ольшанский // Metallургия и коксохимия : респ. межвед. научно-техн. сборник. – Киев : Техніка, 1975. – Вып. 45. – С. 3-7. – Библиогр.: с. 7 (Metallургическая теплотехника).
17. **Капустин, Е. Л.** Программирование нагрева металла по расходу топлива с учетом технологических ограничений [Текст] / Е.Л. Капустин, Л. Э. Гольдфарб, Г. Н. Сидорин и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 7. – С. 114-118. – Библиогр.: с. 118.

18. **Ревун, М. П.** Оптимизация нагрева металла при использовании двух видов топлива и кислорода [Текст] / М. П. Ревун, В. Н. Погорелов, А. И. Чепрасов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 1. – С. 79-81. – Библиогр.: с. 81.
19. **Ольшанский, В. М.** Нагрев тонкого тела с минимальной стоимостью расходуемого топлива [Текст] / В. М. Ольшанский, В. Я. Гринберг // Металлургия и коксохимия : респ. межвед. научно-техн. сборник. – Киев : Техніка, 1980. – Вып. 68. – С. 39-42. – Библиогр.: с. 42 (Металлургическая теплотехника).
20. **Гольдфарб, Э. М.** Оптимальный режим нагрева металла по критерию минимума суммарной стоимости расходуемого топлива и потерь металла на окисление [Текст] / Э. М. Гольдфарб, В. С. Ибряев // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 12. – С. 144-148. – Библиогр.: с. 148.
21. **Минаев, А. Н.** К вопросу нагрева тонких тел с заданной точностью [Текст] / А. Н. Минаев, В. Я. Гринберг, В. М. Ольшанский, Ю. С. Борбоц // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 7. – С. 184-186. – Библиография отсутствует.
22. **Фельдбаум А.А.** Основы теории оптимальных автоматических систем [Текст] / А. А. Фельдбаум. – М. : Наука, 1966. – 623 с. – Библиогр.: с. 594-618. – 13000 экз.
23. **Понтрягин, Л. С.** Принцип максимума в оптимальном управлении [Текст] / Л. С. Понтрягин. – М. : Наука, 1989. – 60 с. – Библиогр.: с. 60. – 4000 экз. – ISBN 5-02-014193-3.
24. **Беллман, Р.** Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман. – М. : Мир, 1960. – 400 с. – Библиография в конце разделов. – 2500 экз.
25. **Коротин, А. Н.** Математическая модель оптимизации режима работы термической печи с выдвигаемым подом [Текст] / А. Н. Коротин, Л. С. Крылова, А. И. Челышев // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов государственной металлургической академии Украины. – Днепропетровск, 1989. – Т. 2. – С. 163-166. – Библиогр.: с. 166.
26. **Крылова, Л. С.** Расчет теплообмена в камерной нагревательной печи с учетом неизотермичности газового объема [Текст] / Л. С. Крылова, В. А., Горбунов // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск : МетАУ, 1989. – Т. 2. – С. 167-168. – Библиогр.: с. 168.
27. **Бровкин, Л. А.** О режиме нагрева в промышленных печах с минимальным окислением [Текст] / Л. А. Бровкин, А. К. Соколов // Известия Вузов. Черная металлургия – 1979. – № 7. – С. 161-165. – Библиогр.: с. 165.
28. **Самойлович, Ю. А.** Определение перепада температуры в слое окалины, растущем на поверхности нагреваемой стальной заготовки [Текст] / Ю. А. Самойлович // Нагрев и охлаждение стали. Теплотехника слоевых процессов : сборник научных трудов ВНИИНТ, Вып. 23. – М. : Металлургия, 1970. – С. 71-81. – Библиогр.: с. 80-81.
29. **Баранов, В. В.** Имитационная модель окисления стали с учетом фазовых превращений в период томления при нагреве слитков в колодцах [Текст] / В. В. Баранов // Применение вычислительных средств в теплотехнических и энергетических расчетах : межвуз. сборник. – Свердловськ : Изд-во УПИ, 1987. – С. 62-67. – Библиогр.: с. 67.
30. **Арутюнов, В. А.** О температурных условиях дожигания горючих составляющих атмосферы в металлургических агрегатах [Текст] / В. А. Арутюнов, А. Я. Стомахин, А. В. Егоров // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 9. – С. 3-6. – Библиогр.: с. 6.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2016 р.
Рецензент, проф. М.П. Ревун