

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Анотація: Виробництво вуглецевих виробів є енергоємним процесом, який широко використовується у рідних галузях промисловості. У даній роботі розроблено алгоритм керування процесом графітування, який за рахунок інтенсифікації процесу дозволяє досягти його мінімальної тривалості при умові забезпечення заданого ступеня графітування готової продукції.

Ключові слова: Вуглецеві вироби, керування, алгоритм, графітування, імітаційне моделювання, печі Ачесона, схема-алгоритм.

Вступ

У народному господарстві України виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різних визначальних для країни галузях промисловості, технологічні процеси яких нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші [1].

Виробництво вуглецевих виробів є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним [2–4]. Саме тому задача підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-технічною задачею особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Графіт широко використовується як футеровочний матеріал в доменних та феросплавних печах, атомній промисловості, є незамінним в електротермії. Значним споживачем графітованих виробів є алюмінієве виробництво.

Виробництво графітованої продукції складне, багатостадійне та дуже енергоємне. При цьому на заключну стадію – процес графітування – припадає до 80% загальних енерговитрат, що становить 8-10 МВт-годин на 1 тону продукції. Тому задача підвищення ефективності процесу графітування у виробництві вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Непродуктивні витрати теплоти у процесі графітування вуглецевих виробів тим менші, чим швидше відбувається розігрів керн печі (більша частка енергії витрачається на нагрівання виробів) [2]. Усі відомі способи керування піччю графітування у тій чи іншій формі реалізують ідею прискореного підведення потужності (а, отже, і розігріву керн печі) при гарантованому забезпеченні цілісності виробів.

Існуючі промислові системи керування процесом графітування у печах Ачесона здебільшого належать до категорії людино-машинних (автоматизованих) і найчастіше реалізують метод керування за електротехнічними параметрами [5]. Даний спосіб оснований на припущенні, що температура керн знаходиться в прямій залежності від кількості енергії, підведеної до печі [2].

Керування процесом здійснюють за заздалегідь розробленим регламентом, що включає початкову потужність печі, графік погодинного нарощування потужності та питомі витрати енергії для визначення моменту припинення кампанії графітування. Додатково практикують вимірювання температури периферії керн для уточнення моменту припинення кампанії графітування.

Регламент графітування вуглецевої продукції кожного типу розробляють експериментально на основі тривалої практики або розраховують приблизно за допомогою математичної моделі температурного поля для кожної окремої конструкції печі графітування. При цьому береться до уваги той факт, що скорочення тривалості кампанії означає зменшення тепловтрат та підвищення ефективності процесу графітування, але пришвидшення розігріву керн збільшує нерівномірність температурного поля в об'ємі заготовок, що збільшує термонапруження [6].

Швидкість розігріву обмежують так, щоб за відсутності достовірної інформації про температурний стан керн, унеможливити руйнування виробів (внаслідок термонапружень) при будь-яких збурювальних впливах. Тому спосіб часто призводить до значних перевитратам електроенергії, а при змушених простоях відсутні надійні рекомендації щодо продовження процесу.

Керування процесом графітування шляхом зміни напруги печі в залежності від кількості підведеної енергії можна доповнювати зміною режиму охолодження футеровки – керування за температурою футеровки. Для цього необхідно організувати визначення температури футеровки впродовж кампанії [7].

Автори [8] вважають, що крива активного опору пічного контуру повністю відображує основні процес в печі і її стала ділянка відповідає досягненню максимальних температур в керні, що дає змогу визначати час припинення підведення потужності до печі. На підставі цього у [9] запропоновано спосіб керування процесом графітування та визначення моменту закінчення кампанії за

характером зміни та досягнутим кінцевим значенням омічного опору печі. Крім визначення моменту припинення кампанії графітування, тут пропонується визначати середню температуру керна як величину, обернено пропорційну омічному опору. Спосіб використовується в області високих температур (вище 1100°C) де опір печі, на думку авторів, змінюється за логарифмічним законом.

Ці способи прості в застосовуванні, але мають надзвичайно низьку точність, оскільки крива опору печі переважно характеризує процеси в пересипці (опір об'єму пересипки значно переважає опір вуглецевих заготовок). Крім того, використання узагальнених показників знижує якість керування і потенційно здатне призвести як до перевитрат електроенергії, так і до руйнування виробів.

У праці [5] запропонований алгоритм керування процесом графітування та закінчення кампанії за величиною ступеня графітування у характерній точці простору печі. Дана величина розраховується за математичною моделлю, яка являє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних. Розв'язок такої математичної моделі потребує значного часу навіть для сучасних обчислювальних засобів. Ця обставина суттєво обмежує застосування даного методу у системах керування реального часу. Крім того, визначення розташування характерної точки є суб'єктивним, що може позначитися на кінцевих результатах графітування.

Постановка задачі дослідження

Графітування вуглецевих виробів, до яких відносяться електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, як правило, здійснюється в електричних печах опору по технології Ачесона. Печі Ачесона характеризуються істотною нерівномірністю розподілу температурного поля та нестабільністю електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження. При швидкому нагріванні печі збільшується нерівномірність температурного поля і, як наслідок, зростає термонапруження у виробках, що може призвести до браку продукції. У виробничих умовах з метою запобігання випуску бракованої продукції здійснюється опосередковане оцінювання термопружного стану виробів, що призводить до перевитрат електроенергії, а значить, до зниження ефективності виробництва.

Ще одним чинником перевитрат енергоресурсів є неточне визначення тривалості кампанії графітування, яка для гарантованого забезпечення нормативної якості готової продукції, як правило, триває довше, ніж потрібно.

Важливим показником ефективності виробництва вуглецевих виробів є якість кінцевої продукції, яка визначається державним стандартом України [10]. Згідно стандарту електроди повинні мати високу теплопровідність та малий

коефіцієнт температурного розширення, щоб уникнути руйнування електродної свічі внаслідок температурних напружень. Крім того, електроди сталеплавильних печей зазнають значних механічних навантажень, спрямованих під кутом до їх осі, що робить механічну міцність на вигин та розтяг надзвичайно важливим показником якості. В залежності від типу продукції до показників якості відносять питомий електричний опір електродів, оскільки витрати останніх у сталеплавильних печах мають лінійну залежність від цього показника [5, 6]. Інтегральним показником якості графітованої продукції є ступінь графітування [5].

Названі вище обставини викликають необхідність з метою підвищення ефективності процесу графітування вуглецевих виробів розроблення сучасної системи оптимального керування ним на основі аналізу поточного стану технологічного процесу. Така система керування повинна забезпечувати випуск готової продукції заданої якості при функціонування процесу графітування у режимі ресурсо- та енергозбереження з урахуванням можливих непередбачуваних відключень енергоживлення. Розв'язання цієї задачі і є метою даної статті.

Формування задачі керування

У статті [11] показано, що, враховуючи ту обставину, що процес графітування є завершальним у виробництві вуглецевих виробів, то як критерії економічної ефективності функціонування даного процесу доцільно вибрати прибуток від реалізації готової продукції.

Як відомо [12, 13], даний показник має дві складові – продажну вартість та економічні витрати виробництва. Перша складова залежить від ринкової ситуації і не пов'язана з технологічним процесом графітування безпосередньо.

Для збільшення прибутку треба зменшувати другу складову – затрати на виробництво.

Як свідчать експериментальні дослідження [5, 14], які підтверджуються даними літературних джерел [1, 4, 6, 15], найбільш ефективним способом зменшення витрат на процес графітування є скорочення кампанії графітування шляхом її інтенсифікації [5, 16]. При інтенсивному розігріванні заготовок, що графітуються, зменшуються втрати в оточуюче середовище і відповідно збільшується доля акумульованої теплоти, що йде на графітування.

Зменшення непродуктивних витрат акумульованої енергії, тобто витрат, які фактично потрібні для утворення графітованих виробів заданої якості, також скорочує тривалість кампанії графітування.

З урахуванням наведеного вище можна стверджувати, що мінімізація тривалості кампанії графітування при умові забезпечення заданих показників якості графітованих виробів одночасно забезпечить максимізацію прибутку виробництва.

Інтегральним показником якості графітованих виробів є ступінь графітування. Отже, задача оптимального керування процесом графітування вуглецевих виробів формулюється таким чином: за рахунок інтенсифікації процесу досягти його мінімальної тривалості при умові забезпечення заданого ступеня графітування готової продукції.

Пропонується наступний алгоритм керування, схема-алгоритм якого показана на рис.1.

Блок 1 формує початкові дані. До них відносяться: стартові струм та напруга печі графітування $I(0)$ та $U(0)$ відповідно (задається технологічним регламентом), початкові значення температур $T(0)$ у характерних точках в режимі нагрівання (фактично температура оточуючого середовища), початкова величина ступеня графітування $\beta=0$, початкове значення кроку розрахунку (дискретного часу) $k=0$.

У сучасних умовах доволі часто відбувається непередбачуване відключення електричного живлення печі графітування. Тому перевіряють чи працює піч у штатному режимі (блок 2 – «Ні»), тобто коли електричне живлення подається.

У штатному режимі роботи печі весь процес графітування можна умовно поділити на 2 етапи – нагрівання та охолодження. Після включення печі у роботу у штатному режимі у блоці 3 за допомогою математичної моделі нагрівання розраховують температуру у характерних точках у наступний момент часу $k+1$. До характерних точок відносяться точки всередині заготовки, які розташовані: у торці печі та верхньому ряді периферії на кінці та по центру заготовки (точки з максимальним перепадом температур), у торці печі та нижньому ряді периферії (точки з мінімальною температурою).

У блоці 4 перевіряють чи розпочався власне процес графітування (блок 4 – «Так») та розраховують ступінь графітування у блоці 5 за формулою:

$$\beta = e^{-B(T)\tau}.$$

Блоки 6 ... 12 призначені для розрахунку часу, що залишився до оптимального моменту закінчення процесу графітування $\Delta t_{зуп}$. У блоці 6 виконуються потрібні переприсвоєння. Блок 7 за математичною моделлю охолодження розраховує температуру $T(m+1)$ у характерній точці режиму охолодження. Характерні точки для режиму охолодження це найхолодніші точки: у торцевих заготовках та на периферії нижнього ряду. У блоці 8 визначається ступінь графітування $\beta(m+1)$. Блок 9 перевіряє чи досягли потрібного ступеня графітування $\beta_{зад}$. Якщо так (блок 9 – «так»), то блоком 11 розраховується скільки часу $\Delta t_{зуп}$ залишилося до оптимальної зупинки процесу графітування за формулою

$$\Delta t_{зуп} = (m-k)\Delta\tau,$$

де $\Delta\tau$ – час дискретності розрахунків.

Виконання умови $\Delta t_{зуп} \leq 0$ (блок 12 – «Так») означає, що процес графітування закінчено і робота алгоритму зупиняється.

Далі для визначення максимально допустимої потужності, що подається на піч, блоком 13 перевіряється умова, чи не перевищує максимальний перепад температур у характерній заготовці допустимі межі. Якщо перепад температур допустимий (блок 13 – «Так»), перевіряється чи досягнуто з точки зору безпеки ведення процесу графітування максимально допустимого значення струму I_{max} . Якщо це значення не перевищене (блок 14 – «Ні»), збільшується напруга наперед задану величину ΔU (блок 15) і здійснюється перехід до блоку 3.

Якщо розрахований перепад температур у характерній заготовці перевищує допустиме значення (блок 13 – «Ні»), або електричний струм досяг свого максимально допустимого значення (блок 14 – «Так»), блоком 16 визначається зменшена на величину ΔU напруга, блок 17 виконує потрібні переприсвоєння і з переходом до блоку 2 починається новий цикл роботи алгоритму.

Коли має місце аварійне відключення електроживлення печі (блок 2 – «Так») і цей період перевищує 20 хвилин, починається режим охолодження [5]. У цьому режимі у блоці 18 на основі математичної моделі охолодження розраховують температуру заготовок $T(k+1)$ у характерній точці. На етапі охолодження характерні точки розташовані на поверхні заготовок, які охолоджуються найшвидше (по торцям печі та нижній ряд периферії) та мають найбільший перепад температур (центральні заготовки верхнього ряду).

Якщо температура найбільш холодних заготовок перевищує 2000 °С, це означає, що процес графітування продовжується (блок 19 – «Так»), якщо ні, то здійснюють перехід до блоку 17. У разі, коли процес графітування після аварійного відключення електроживлення (блок 19 – «Так») продовжується, визначають поточний ступінь графітування (блок 20), перевіряють чи розраховане значення відповідає заданому (блок 21). Якщо досягнуто потрібного ступеня графітування $\beta_{зад}$ (блок 21 – «Так»), то відновлення електроживлення не потрібно і робота алгоритму закінчується.

Якщо температура заготовок у характерній точці стала меншою за температуру початку графітування (блок 19 – «Ні»), то здійснюється перехід до блоку 17, в якому виконується підготовка до наступного кроку розрахунків.

Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму було проведено імітаційне моделювання однієї кампанії графітування. Для порівняння з реальним процесом графітування були використані дані, наведені у [5].

На рис. 2 представлені графіки підведення потужності електричного струму на піч графітування: 1 – реальна кампанія; 2 – результат роботи запропонованого алгоритму керування. Під час проведення кампанії двічі вимикалося електроживлення. Сумарний простій у цій кампанії склав 7 год. 40 хв.

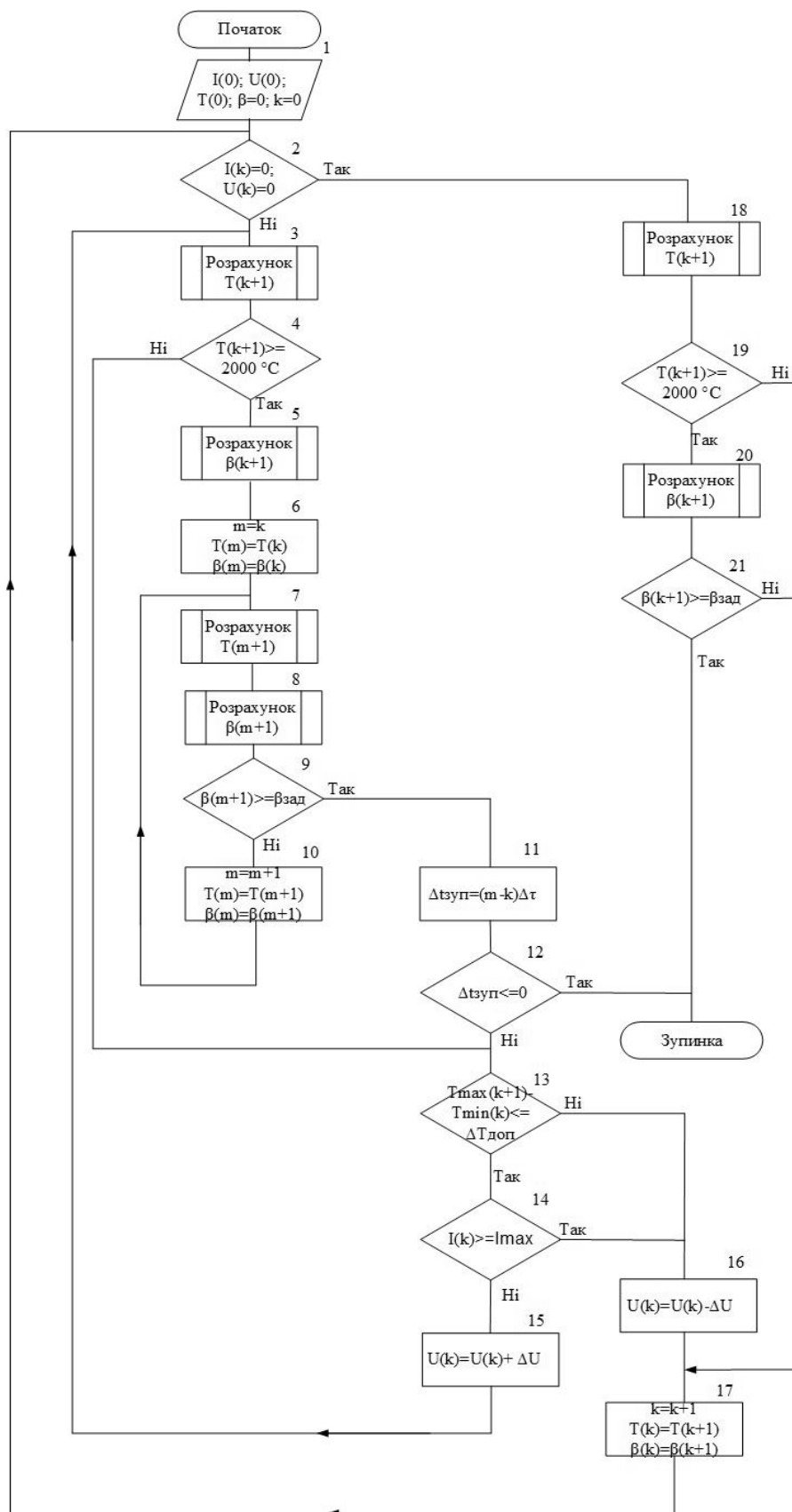


Рис. 1. Структурна схема алгоритму керування процесом графітування

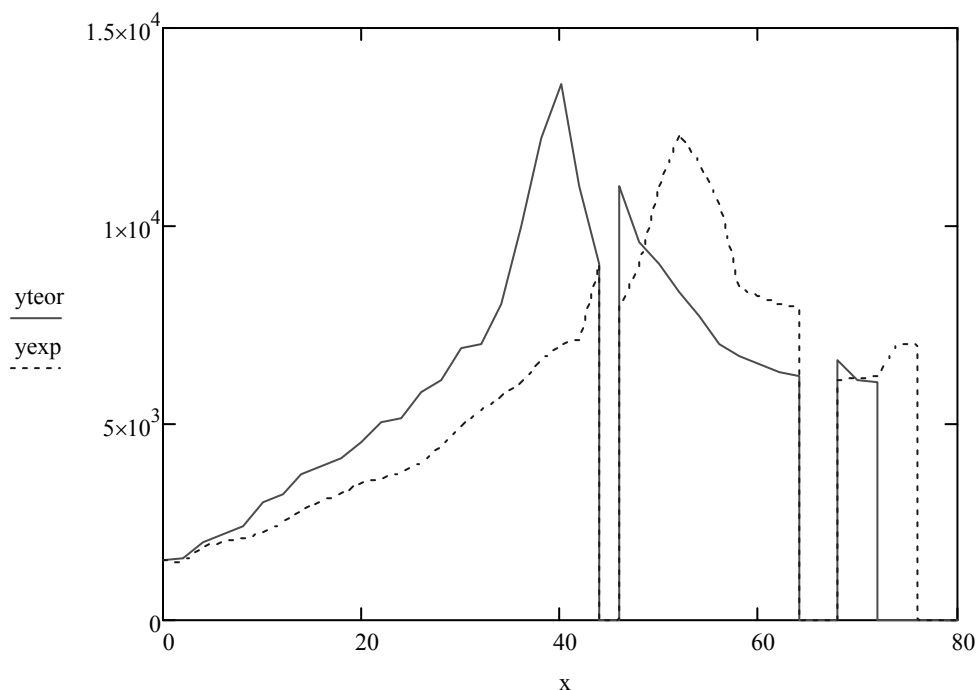


Рис. 2. Графік підведення потужності електричного струму на піч графітування

Показники фактичної та розрахункової кампанії графітування наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Техніко-економічні показники кампанії графітування

Показники	Фактична	Розрахункова
Корисна маса завантаження	70,5 т	70,5 т
Загальний простій	7 год. 40 хв.	7 год. 40 хв.
Планова витрата енергії	408900 кВт/год	408900 кВт/год
Фактична витрата енергії	427900 кВт/год	417628 кВт/год
Питома витрата енергії	6069,5 кВт/год	5923,8 кВт/год
Тривалість кампанії	78 год. 20 хв.	71 год. 10 хв.

Порівняння даних представлених у табл. 1, свідчить про ефективність запропонованого алгоритму графітування вуглецевих виробів.

Висновки

Запропонований алгоритм керування процесом графітування у виробництві вуглецевих виробів. Даний алгоритм дозволяє визначити мінімальну тривалість технологічного процесу при умові досягнення заданих показників якості готової продукції, що забезпечує функціонування виробництва у режимі ресурсо- та енергозбереження.

Проведено імітаційне моделювання запропонованого алгоритму керування. Порівняння результатів моделювання з даними реальної кампанії графітування свідчить про високу ефективність запропонованого алгоритму керування.

Даний алгоритм передбачає використання математичної моделі процесу графітування. Існуючі математичні моделі являють собою систему нелінійних нестационарних диференціальних рівнянь у частинних похідних. Розв'язання такої системи рівнянь потребує значного часу навіть сучасними засобами обчислювальної техніки. Тому для використання запропонованого алгоритму у системі керування процесом графітування реального часу потрібно розробити спрощену математичну модель. Дана задача і є предметом подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. Производство электродной продукции. М.: Металлургия, 1985. 129 с.
2. Rand B., Appleyard S.P., M. Yardim F. Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance. Springer Science & Business Media, 2012. 347 p.
3. Savage G. Carbon-carbon composites, Chapman and Hall, 1993. 401 p.
4. Inagaki M., Meyer R.A. Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 31 ed. New York, 1999, 149 p.
5. Коржик М.В. Математичне моделювання та автоматизоване керування процесом графітації в печах Ачесона: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Київ, 2010. 230 с.
6. Чичулин Н.И. О режимах графитации электродных изделий: сб. научн. тр. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции. Вып. 5. 1973. С. 114–121.
7. Самохин И.Н., Розенман И.М., Сасс-Тисовский В.Б. Опыт эксплуатации печей с принудительным охлаждением стен и подины при повышенной плотности тока в керне для производства конструкционного графита: сб. научн. тр. Вопросы графитации углеродистых материалов. 1968. С. 70–78.
8. Знамеровский В.Ю., Яшкина В.В. Исследование режимов ввода энергии в печи графитации. Промышленная энергетика. № 11. 1985. С. 40–42.
9. Erwin D.L. Industrial Chemical Process Design. New York. 2002. 579 p.
10. ДСТУ 4494:2005 Електроди зграфітовані та ніпелі до них. Загальні технічні умови. Зі зміною № 1 (IEC 60239:1997, NEQ)
11. Жученко О.А. Statement of the optimization problem of carbon products production. Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів» Vol. 8, issue 2. 2016. С. 39-44
12. W. Forst, D. Hoffmann. Optimization—Theory and Practice. Springer-Verlag New York. XVIII, 402 p.

13. M. Al-Baali, L. Grandinetti, A.Purnama. Numerical Analysis and Optimization. Springer International Publishing. XVIII, 2018, 272 p.

14. Яримбаш Д.С. Системи живлення та режими потужних технологічних комплексів електропечей опору прямого нагріву: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. Кременчуг, 2015.

15. Соседов В.П., Сасс В.Б. Тисовский А.С., О рациональном графике подъема мощности и температуры апроцессе графитации. Цветные металлы. № 2. 1967. С. 62–63.

Карвацький А.Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів : моног. / А.Я. Карвацький, Є.М. Панов, С.В. Кутузов [та інш.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 352 с.