

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

А. І. Жученко, М. В. Коржик, С. В. Кутузов

**КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТАЦІЇ
ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРОДНОЇ ПРОДУКЦІЇ**

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

УДК 661.666.2
ББК 34.314
Ж94

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут»
(Протокол № 8 від 1 липня 2013 р.)*

Рецензенти: Ладанюк А. П., д-р техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри автоматизації процесів управління Національного університету харчових технологій

Панов Є. М., д-р техн. наук, професор, директор НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» при Національному технічному університеті України «КПІ»

Текст монографії подано у авторській редакції

Жученко А. І.

Ж94 Жученко А. І., Коржик М. В., Кутузов С. В. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції [Текст] : монографія. – К.: НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2013. – 224 с.: іл. – Бібліогр.: 201–217. – 300 прим.

ISBN 978-966-518-634-2

У монографії розглянуто питанням автоматизованого керування процесом графітації в печах Ачесона постійного струму.

Проведено аналіз експериментальних досліджень кампаній графітації, виявлено особливості протікання основних процесів в печі Ачесона. Здійснено декомпозицію задачі керування процесом. Сформульовано критерії оптимізації для частинних задач керування. Розроблено адаптивну модель температурного поля печі графітації та модель термопружного стану виробів під час кампанії графітації. Розроблено ефективний метод оцінювання ступеня графітації виробів під час кампанії графітації. Створено алгоритми керування стадіями процесу графітації. Запропоновано дворівневу систему керування процесом графітації в печах Ачесона постійного струму, яка на базі розроблених алгоритмів забезпечує істотну економію електроенергії на кожну кампанію графітації та зменшує їх тривалість.

Для фахівців з автоматизації електродного виробництва, електрометалургії, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**УДК 661.666.2
ББК 34.314**

ISBN 978-966-518-634-2

© А.І. Жученко, М.В.
Коржик, С.В. Кутузов, 2013
© НТУУ «КПІ» (ІХФ), 2013

ВСТУП

Сучасні світові тенденції у виробництві сталі пов'язані передусім з переходом галузі на використання дугових сталеплавильних печей високої та надвисокої потужності (70 .. 180 МВА), що вимагає постійного нарощування обсягів виробництва графітованих електродів великого діаметра, які припускають підвищену густину струму та характеризуються високою механічною міцністю і термостійкістю.

Виробництво графітованої продукції складне, багатостадійне та дуже енергоємне. При цьому на заключну стадію – графітацію – припадає до 80 % загальних енерговитрат [1]. В умовах постійного зростання вартості електроенергії зменшення енерговитрат на графітацію при забезпеченні високої якості кінцевої продукції (підвищення ефективності процесу) є актуальною науковою і технічною задачею.

Графітацію великогабаритної продукції, до якої належать електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, як правило, здійснюють в електричних печах опору по технології Ачесона. Печі Ачесона характеризуються істотною нерівномірністю розподілу температурного поля та нестабільністю електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження.

Підвищити ефективність графітації можна інтенсифікацією процесу. При швидкому нагріванні печі збільшується нерівномірність температурного поля і, як наслідок, збільшуються термонапруження у виробках. Термічна міцність виробів виступає основним чинником, що обмежує інтенсифікацію процесу. При цьому опосередкована оцінка термопружного стану виробів призводить до перевитрат електроенергії та знижує ефективність виробництва в цілому. Іншим чинником перевитрат електроенергії є неточне визначення необхідної тривалості кампанії графітації.

Задачу підвищення ефективності печей Ачесона можна розв'язати шляхом впровадження системи керування, що реалізує оптимальне ведення процесу графітації на основі аналізу термопружного стану виробів та ступеня їх графітації.

Неможливість прямого контролю властивостей електродних виробів під час кампанії графітації, а також відсутність промислових методів вимірювання температурного поля печі Ачесона у всьому діапазоні температур обумовлює той факт, що досьгодні жодне графітове виробництво в Україні та країнах СНД не обладнано системою керування, яка б забезпечила оптимальну динаміку підведення потужності в реальному часі.

У зв'язку з цим задача побудови енергоощадної системи керування процесом графітації є надзвичайно актуальною.

Метою роботи є розв'язання актуальної науково-технічної задачі – зменшення енергоємності промислового процесу графітації в печах Ачесона постійного струму шляхом створення автоматизованої системи керування даним технологічним процесом, яка забезпечує зменшення енерговитрат на графітацію при високій якості кінцевої продукції за рахунок визначення оптимальної швидкості розігріву печі на основі аналізу термопружного стану виробів та мінімально необхідної тривалості кампанії графітації на основі поточного аналізу ступеня графітації виробів.

У розділі 1 представлено загальну характеристику процесу графітації та особливості технології Ачесона, проаналізовано рівень інформаційного забезпечення та підходи до моделювання основних процесів печі графітації. Розглянуто існуючі способи керування процесом графітації в печах Ачесона та проаналізовано сучасний стан автоматизації переділу графітації. Сформульовано завдання дослідження.

У розділі 2 подано та проаналізовано результати експериментальних досліджень кампаній графітації з ординарним та форсованим регламентом підведення потужності, виявлено основні закономірності енергоспоживання та визначено характер розподілу температурного поля в печі Ачесона впродовж кампанії.

У розділі 3 обґрунтовано вибір критерію керування, здійснено декомпозицію задачі керування та сформульовано часткові задачі керування, розроблено стратегії керування стадіями кампанії графітації у відповідності з частковими задачами, обрано методи реалізації стратегій, запропоновано дворівневу структуру системи керування.

У розділі 4 розроблено модель електричного поля ядра печі графітації постійного струму, адаптивну модель температурного поля печі, на основі числового експерименту досліджено теплові процеси в ядрі печі графітації та визначено ступінь впливу зовнішніх збурень на температурний стан ядра, розроблено модель термopружного стану виробів, що враховує особливості термічного розширення електродних заготовок у всьому температурному діапазоні графітації, та створено метод визначення часу припинення кампанії графітації шляхом оцінювання ступеня графітації виробів. Також розроблено спрощену модель електричного поля ядра печі графітації для заготовок діаметром 555 мм при традиційній схемі пактування.

У розділі 5 розроблено та досліджено алгоритми функціонування системи керування процесом графітації в печах Ачесона для різних стадій та режимів роботи.

В додатках наведено результати експериментальних досліджень кампаній графітації, апроксимаційні розрахунки електро- та теплофізичних властивостей пічних матеріалів та результати імітаційного моделювання температурних полів печі графітації.

Робота виконана на кафедрі автоматизації хімічних виробництв інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

τ	час, с, год;
η	крок навантаження, год;
ψ	часовий інтервал, с;
x, y, z	ортогональні координати, м;
Ω	просторова область, визначена на координатах x, y, z ;
Γ	гранична поверхня, визначена на координатах x, y, z ;
$\mathbf{n}$	зовнішня нормаль до поверхні (вектор);
F	площа поверхні, м ² ;
T	температура, К, °С;
Θ	температурний інтервал, К;
δ	відносний перепад температур, К/м;
$\mathbf{J}$	вектор густини струму, А/м ² ;
J	густина струму, А/м ² ;
$\mathbf{E}$	вектор напруженості електричного поля, В/м;
μ	питома електропровідність, (Ом · м) ⁻¹ ;
ρ	питомий електричний опір, Ом · м;
R	електричний опір, Ом;
ϕ	електричний потенціал, В;
U	напруга електричного струму, В;
I	сила електричного струму, А;
P	електрична потужність, Вт;
Q	об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м ³ ;
r	радіус електродної заготовки, м;
d	відстані між молекулярними шарами, нм;
b, h, l, v, w	інші геометричні параметри, м;
Δ	символ перепаду величин;
σ	напруження, Па;

ε	відносна деформація;
u	переміщення, м;
e	коефіцієнт температурного розширення, K^{-1} ;
E	модуль Юнга, Па;
G	модуль зсуву, Па;
ν	коефіцієнт Пуассона;
N	тиск на поверхню, Па;
s	максимальні напруження, Па;
S	область припустимих напружень;
K	масштабний коефіцієнт; коефіцієнт корисної дії;
W	поправковий коефіцієнт;
c	питома ізобарна масова теплоємність, Дж/(кг·К);
γ	густина матеріалу, кг/м ³ ;
λ	теплопровідність, Вт/(м·К);
α	коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м ² ·К);
β	ступінь графітації;
H	ентальпія;
ξ	задана точність визначення термічних напружень, Па;
M	маса, кг;
V	об'єм, м ³ ;
A	коефіцієнт експоненціальної залежності; акустична емісія;
A	вектор параметрів;
a	коефіцієнт полінома;
$g = 9.81$	пришвидшення вільного падіння, м/с ² ;
C	матриця пружності;
q	тепловий потік через поверхню;
Y	критерій керування;
L	теплота пароутворення, Дж/кг;
χ	середній вологовміст;

<i>B</i>	кінетичний параметр (стала швидкості графітації), год ⁻¹ ;
<i>f</i>	функція;
<i>D</i>	дискретний сигнал.

Верхні індекси

<i>n</i>	нормальна складова вектора;
<i>t</i>	тангенціальна складова вектора;
<i>tns</i>	зусилля на розтягнення (tensile strength).

Нижні індекси

<i>set</i>	заданий (preset);
<i>i, j, k, n</i>	дискретні величини;
<i>r</i>	радіальний;
<i>x, y, z</i>	осьовий або складовий;
<i>c</i>	центральний;
<i>a</i>	поточний;
<i>m</i>	модельний;
<i>ma</i>	адаптивний;
<i>e</i>	експериментальний;
<i>o</i>	ординарний;
<i>f</i>	форсований;
<i>opt</i>	оптимальний;
<i>reg</i>	регламентний;
<i>v</i>	об'ємний;
<i>m</i>	масовий;
<i>v</i>	вологий;
<i>c</i>	сухий;
<i>z</i>	зовнішній;
<i>пу</i>	пароутворення;
<i>ф</i>	футеровки;

ез	електродної заготовки;
пс	пересипки;
пг	пересипки графітованої;
ті	теплоізоляції;
пв	повітря.

Скорочення

ПЕО	питомий електричний опір;
РЕ	розрахунковий елемент;
РФ	розрахунковий фрагмент;
СК	система керування;
ВТІ	виробничо-технологічна інструкція;
ККД	коефіцієнт корисної дії.

1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Графіт є унікальним термостійким матеріалом, оскільки його експлуатаційні властивості поліпшуються із зростанням температури [2]. Значна механічна міцність, висока теплопровідність (це єдиний неметалевий матеріал, теплопровідність якого перевищує теплопровідність заліза [3]) та низький коефіцієнт лінійного розширення дозволяють використовувати його у конструкційних виробках, що повинні мати сталі розміри в широкому діапазоні температур. Крихкий в звичайних умовах, графіт при високих температурах набуває пластичних властивостей [4, 5].

Антифрикційні властивості графітових виробів характеризуються низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю, що обумовило застосування графіту для виготовлення мастил та ковзних струмознімачів [6].

Графіт широко використовується як футеровочний матеріал в доменних та феросплавних печах, атомній промисловості та інш. Низький питомий електричний опір (ПЕО) у сполученні з вказаними властивостями роблять графіт незамінним в електротермії, зокрема при виготовленні електродів для дугових сталеплавильних печей, руднотермічних печей для виробництва кристалічного кремнію, феросплавних і рафінувальних печей та печей для переплавлення кольорових металів тощо. Значним споживачем графітованих виробів є алюмінієве виробництво [7].

1.1. Теоретичні основи синтезу штучного графіту

Графітація вуглецевої речовини – це процес упорядкування атомів вуглецю у тривимірну кристалічну структуру під дією високих температур [1].

Штучний графіт має здебільшого гексагональну структуру, схема якої наведена на рис. 1.1. Природні графіти можуть містити істотні включення (до 30 %) полікристалів ромбоєдричної структури, яка вважається нестабільною і переходить в гексагональну при подальшій високотемпературній обробці [3, 8]. За

даними [9] в природних монокристалах гексагонального графіту міститься до 5 об'ємних % графіту ромбоедричної модифікації.

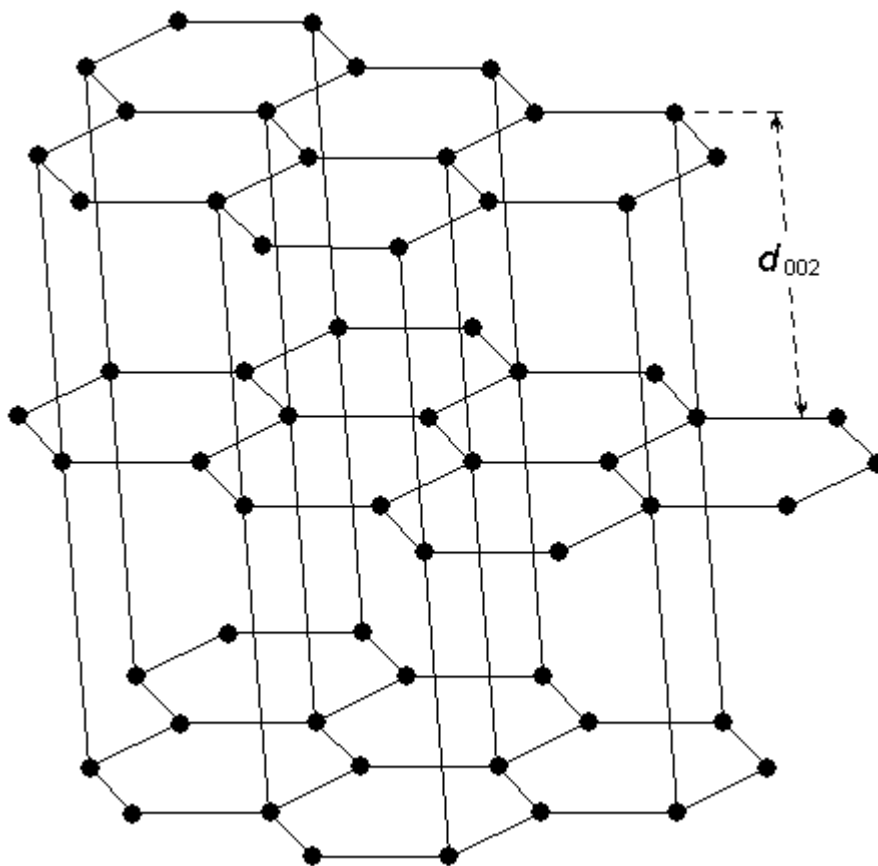


Рис. 1.1. Кристалічна структура графіту

Більшість літературних джерел [2, 10–12] розділяє процес промислової графітації на три специфічні етапи, які розрізняються за характером упорядкування атомів вуглецю.

Перший етап розпочинається, коли температура процесу досягає температури попередньої обробки (обпалювання) заготовок, тобто 800 .. 1000°C. На цьому етапі відбувається карбонізація матеріалу заготовок за рахунок аморфного вуглецю, що вивільняється при руйнуванні залишків органічних речовин, та здійснюється процес упорядкування молекулярних шарів з формуванням плоскої структури, в якій атоми вуглецю утворюють періодичну

сітку з правильних шестикутників. Найближча відстань між атомами в гексагональній структурі складає 0.142 нм (1.42 Å).

Другий етап процесу графітації припадає на діапазон температур 1400 .. 2100°C. На цьому етапі безладно розташовані молекулярні шари переорієнтуються в паралельну структуру. Відбувається формування об'ємних пакетів, в яких паралельні молекулярні площини довільно орієнтовані навколо нормалі до них. Утворюється так звана турбостратна модифікація вуглецю, де середня відстань між паралельними молекулярними площинами складає 0.3425 нм. Таку структуру також називають передкристалізаційною.

Третій етап (етап гомогенної графітації, тобто графітації в твердій фазі) розпочинається при температурі 2000 .. 2100°C. На цьому етапі відбувається об'ємна кристалізація за рахунок азимутального орієнтування вуглецевих сіток та зближення їх в пакетах турбостратної структури. Утворюється полікристалічна структура графіту. Відстань між молекулярними шарами в довершеному графіті складає 0.33526 нм. Тривимірне упорядкування супроводжується поступово прогресуючим із зростанням температури видаленням структурних дефектів гексагональної структури в молекулярних шарах [12].

При температурах, що перевищують 3000°C у вуглецевих матеріалах можуть йти процеси гетерогенної графітації, пов'язані з рекристалізацією речовини, конденсованої з газової фази.

Прийнято оцінювати ступінь гомогенної графітації вуглецевого матеріалу за величиною відстані між молекулярними шарами, отриманою рентгенографічним методом за кутовим положенням інтерференційної лінії (002). Ступінь графітації визначається як відносне зближення молекулярних площин (рис. 1.1) в зразку вуглецевого матеріалу за формулою [2]

$$\beta = \frac{d_{\max} - d_{002}}{d_{\max} - d_{\min}}, \quad (1.1)$$

де $d_{\max}$ – міжплощинна відстань в турбостратній структурі, нм;
 $d_{\min}$ – міжплощинна відстань в довершеній структурі графіту, нм;
 d_{002} – міжплощинна відстань в зразку, що досліджується, нм.

Відповідно до (1.1) на початку гомогенної графітації зразок має ступінь графітації $\beta = 0$, а після остаточного завершення процесу $\beta = 1$.

Теоретична мінімально необхідна кількість енергії для графітації однієї тонни вуглецевого матеріалу складає 1430 .. 1800 кВт·год [13].

1.2. Показники якості графітованих електродів

Вимоги до якості графітованих електродів визначаються умовами їх експлуатації. Найважливішою характеристикою електродів є їх ПЕО, оскільки витрати електродів в сталеплавильних печах мають лінійну залежність від цього показника [10].

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 розривання надзвичайно важливим показником якості [14, 15].

В табл. 1.1 наведено показники якості графітованих електродів, що виробляються на підприємстві УкрГрафіт (м. Запоріжжя, Україна).

Таблиця 1.1

Вимоги до графітованих електродів та ніпелів

Номінальний діаметр, мм	Об'ємна густина, г/см ³	Питомий електричний опір, мкОм·м	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, 1/К	Межа міцності на вигин, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Марка ЕГ (для дугових сталеплавильних, рафінувальних, феросплавних та руднотермічних печей)					
80 .. 150	1.63	7.0	2.1	12.0	8.5
200 .. 350	1.62	7.5	2.2	10.0	7.0
400 .. 600	1.61	8.0	2.3	9.0	6.5
700	1.60	8.0	2.3	8.0	5.5
Марка ЕГП (для дугових сталеплавильних печей великої потужності та установок піч-ківш)					
200 .. 350	1.74	6.0	2.3	15.0	9.0
400 .. 600	1.76	6.5	2.5	14.0	9.5
Марка ЕГСП (для дугових сталеплавильних печей надвеликої потужності та установок піч-ківш)					
200 .. 350	1.73	6.0	1.3	15.0	11.0
400..600	1.71	5.5	1.2	13.0	10.5
Ніпелі для графітованих електродів					
80 .. 150	1.70	5.0	2.2	17.0	18.0
200 .. 550	1.75	4.5	1.0	18.0	18.0
600 .. 700	1.80	4.0	1.0	19.0	19.0

Якість та властивості графітованих електродів визначають припустиму густину струму при їх експлуатації. Як вже відзначалось, здебільшого цей показник якості електродів обумовлений електропровідністю: чим вона вище, тим вище припустима експлуатаційна густина струму [3]. Сучасні великовантажні дугові сталеплавильні печі, оснащені трансформаторами великої та надвеликої потужності, вимагають розвинення густини струму на електродах діаметром 550..700 мм до 25..35 А/см² [10], що потребує заходів контролю якості електродної продукції на етапі виробництва. В табл. 1.2 наведено рекомендовані струмові навантаження при експлуатації графітованих електродів великого діаметра розглянутих марок.

Таблиця 1.2

Навантажувальна здатність графітованих електродів

Номінальний діаметр, мм	Номінальна довжина, мм	Припустима густина струму, А/см ²		
		Марка ЕГ	Марка ЕГП	Марка ЕГСП
150	1200/1500	18 .. 25	—	—
200	1200/1800		20 .. 30	25 .. 35
250		15 .. 20	20 .. 25	
300				
350				
400		15 .. 18	18 .. 22	25 .. 30
450	22 .. 28			
500				
550				
600	2100/2400	10 .. 15	15 .. 20	
700	1800/2100/2400	12	—	—

Всі вказані показники якості поліпшуються з підвищенням ступеня графітації вуглецевого матеріалу [2, 16]. Тому отримання продукції із бажаним ступенем графітації та цілісною внутрішньою структурою при відсутності зовнішніх дефектів гарантує високі експлуатаційні характеристики електродних виробів. Таким чином ступінь графітації можна вважати універсальним показником якості виробів на етапі графітації.

1.3. Технологічні особливості виробництва графітованих електродів

Технологія виготовлення графітованих електродів характеризується багатоетапністю. При цьому кожен з етапів має суттєвий вплив на якість кінцевої продукції [3, 6, 11, 17]. На рис. 1.2 зображено технологічну схему виробництва графітованих електродів великого діаметра (на прикладі технологічного ланцюга SGL Carbon Group, Німеччина).

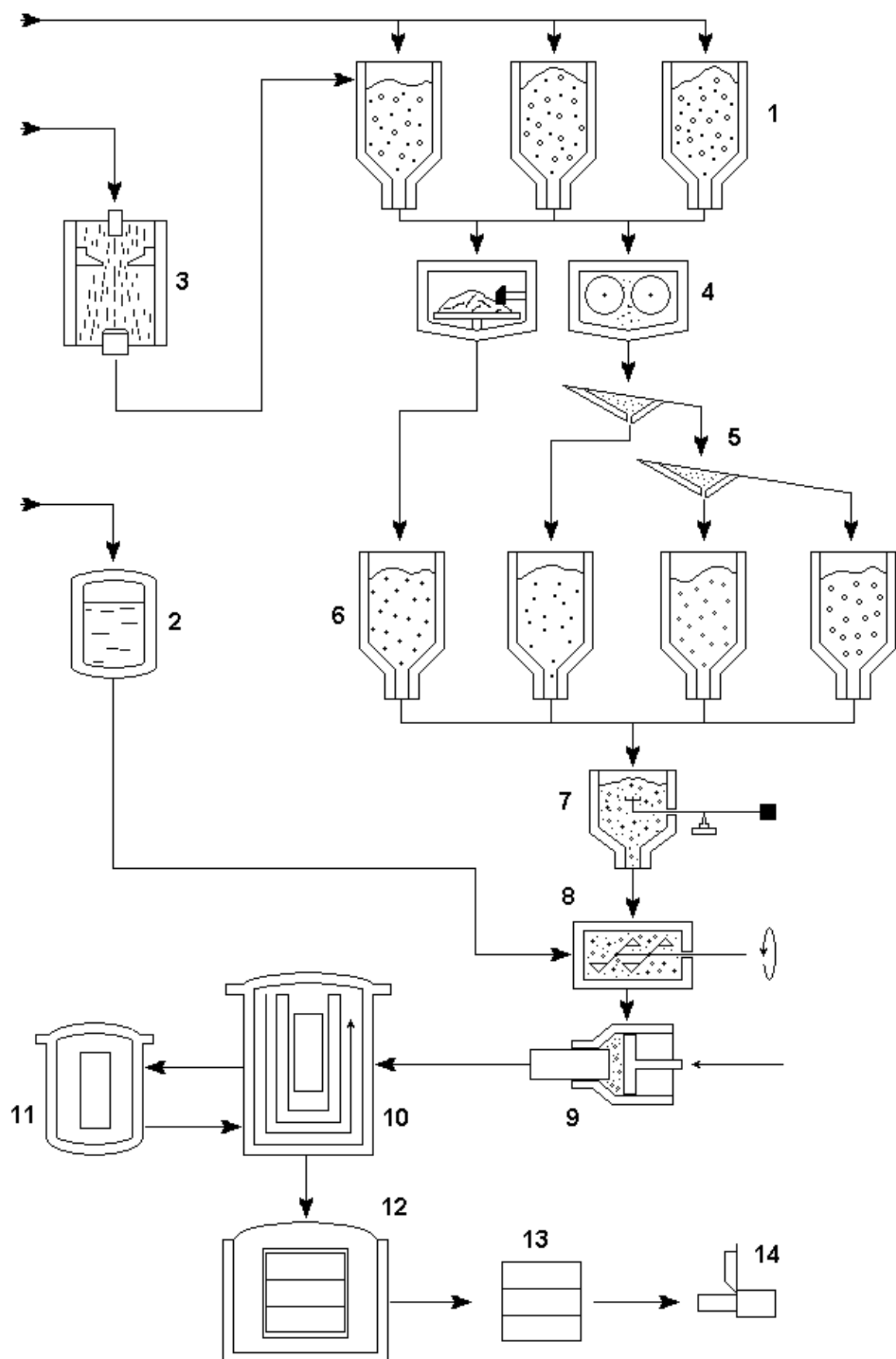


Рис. 1.2. Технологічна схема графітового виробництва

Сировиною для графітованих електродів слугують продукти нафтової та кам'яновугільної промисловості (елеватори 1). Електродні заготовки формують з маси, в якій наповнювачем є піролізні та крекінгові нафтові кокси, антрацити та термоантрацити, або пекові кокси [2]. В якості сполучника використовують середньотемпературний кам'яновугільний пек (див. резервуар з обігрівом 2) - термопластичний матеріал, структура і властивості якого істотно залежать від температури. Пек є остатковою фракцією розгонки кам'яновугільної смоли і має температуру розм'якшення 65 .. 75°C [10].

Перед використанням тверда сировина проходить низку технологічних операцій, першою з яких є дроблення. Розмір шматків після операції складає 40 .. 50 мм.

Подрібнені вуглецеві матеріали надходять в прожарювальні печі 3, де з них видаляється волога та леткі речовини. Метою прожарювання є попередня усадка вуглецевих матеріалів, що значно зменшує об'ємні зміни при подальшій термообробці. Після операції густина, механічна міцність та електропровідність вуглецевого матеріалу зростає. Прожарювання здійснюють без доступу повітря або у відновлювальній атмосфері при високих температурах. Видалення летких речовин з вуглецевих матеріалів починається при 245°C і невинно зростає з підвищенням температури. Стабілізація усадки коксів відбувається при температурі прожарювання не нижче 1300°C, а для антрацитів не нижче 1400°C. Час перебування вуглецевого матеріалу в прожарювальній печі залежить від її конструкції та властивостей самого матеріалу і може сягати 1.5 год.

Після охолодження прожарений вуглецевий матеріал надходить в розмельне відділення 4, де за допомогою валкових та молоткових подрібнювачів його розмелюють до зерен розміром 0.5 .. 10 мм, сортують за допомогою віброгрохотів 5 по фракціям та завантажують в сортові дозувальні бункери 6.

У відповідності з рецептом необхідну кількість (зважувальне відділення 7) кожної фракції та кам'яновугільного пека завантажують в змішувачі 8 з паровим обігрівом. Електродну масу готують впродовж 1 .. 5 год при температурі

115 .. 152°C. В цьому інтервалі температур середньотемпературний пек має найбільшу рухливість і плинність [10].

Охолоджена до 70 .. 110°C електродна маса надходить у пресове відділення 9, де з неї формують так звані “зелені” заготовки. Пресування маси здійснюють формовкою в закриту матрицю, або екструзією через мундштук. Від способу пресування залежить текстура заготовок, яка визначає анізотропні властивості виробів [18].

“Зелені” заготовки охолоджують до затвердіння у водяних ваннах. Температура охолодження повинна бути близькою до нижньої межі пружнопластичного стану сполучника, що створює умови для релаксації внутрішніх напружень.

Охолоджені “зелені” заготовки вертикальними рядами завантажують в кільцеву обпалювальну піч типу “Рідгамер” 10 [146]. Для збереження форми заготовок під час операції обпалення, рівномірності підведення теплоти та запобігання окислюванню простір між рядами заповнюють засипкою з кварцевого піску та гранульованих вуглецевих матеріалів. В печі за допомогою газових пальників підтримується температура 800 .. 1000°C. Операція обпалення триває 200 .. 550 год в залежності від конструкції печі та типу електродних заготовок. При обпаленні відбувається коксування сполучника, що оточує гранули наповнювача, і заготовки спікаються в монолітну композицію.

Після охолодження печі до 100 .. 500°C обпалені заготовки вивантажують, перевіряють на відсутність дефектів та направляють у відділення графітації.

Для підвищення густини, міцності та зниження проникності електродів деяких видів обпалені заготовки перед графітацією попередньо просочують пеком [19]. Цю операцію здійснюють в автоклавах 11 при температурі 230 .. 250°C під тиском 20 .. 25 кПа [11]. Після просочування заготовки повторно обпалюють.

Графітацію електродних заготовок здійснюють в електричних однофазних печах прямого нагрівання 12. Концентрація значної кількості енергії в невеликому об’ємі дозволяє отримувати температури, що сягають 3300°C. Печі графітації

мають періодичну дію. Тривалість кампанії графітації може перевищувати 100 год. Після закінчення кампанії піч остигає впродовж 120 .. 140 год [20], після чого графітовані вироби вивантажують та перевіряють на відсутність дефектів 13.

Як правило, графітовані вироби піддають механічній обробці 14 для отримання необхідних геометричних розмірів. Кінцевою продукцією графітовані вироби стають після визначення їх сортності шляхом перевірки показників якості (п.р. 1.2) на відповідність технічним умовам.

1.4. Характеристика печі графітації як об'єкта керування

Нагрівання електродних заготовок в печах графітації здійснюється за рахунок перетворення електричної енергії в джоулеву теплоту на елементах активного опору [10, 20]. В широкому сенсі під терміном “піч графітації” розуміють весь комплекс обладнання, що містить власне піч, джерело живлення та вторинний струмопідвід, або коротку мережу [17].

На рис. 1.3 зображено варіанти схем живлення печей графітації. Коротка мережа – це система провідників, що передає струм робочої напруги від джерела живлення 1 до робочої зони печі графітації 2 [20]. Коротка мережа містить головний шинний пакет 3, пічні шини 4 (малу і пічну петлю) та електроди. Струмопідвідні електроди одночасно є елементами конструкції печі і мають водяне охолодження (шляхом зрошення) в місцях з'єднання з пічними шинами. Температура в місцях контакту електродів з шинами не повинна перевищувати 90°C [1]. Компенсація реактивної потужності в короткій мережі здійснюється за допомогою конденсаторної установки 5 [21].

В якості джерела живлення, як правило, використовують понижувальний трансформатор 6, який оснащено вбудованим автотрансформатором для регулювання вторинної напруги в широкому діапазоні [22]. При використанні печей графітації постійного струму трансформатор додатково оснащують випрямляючим пристроєм 7 [23]. При необхідності нарощування потужності

джерело живлення утворюють з декількох паралельно працюючих трансформаторів ба.

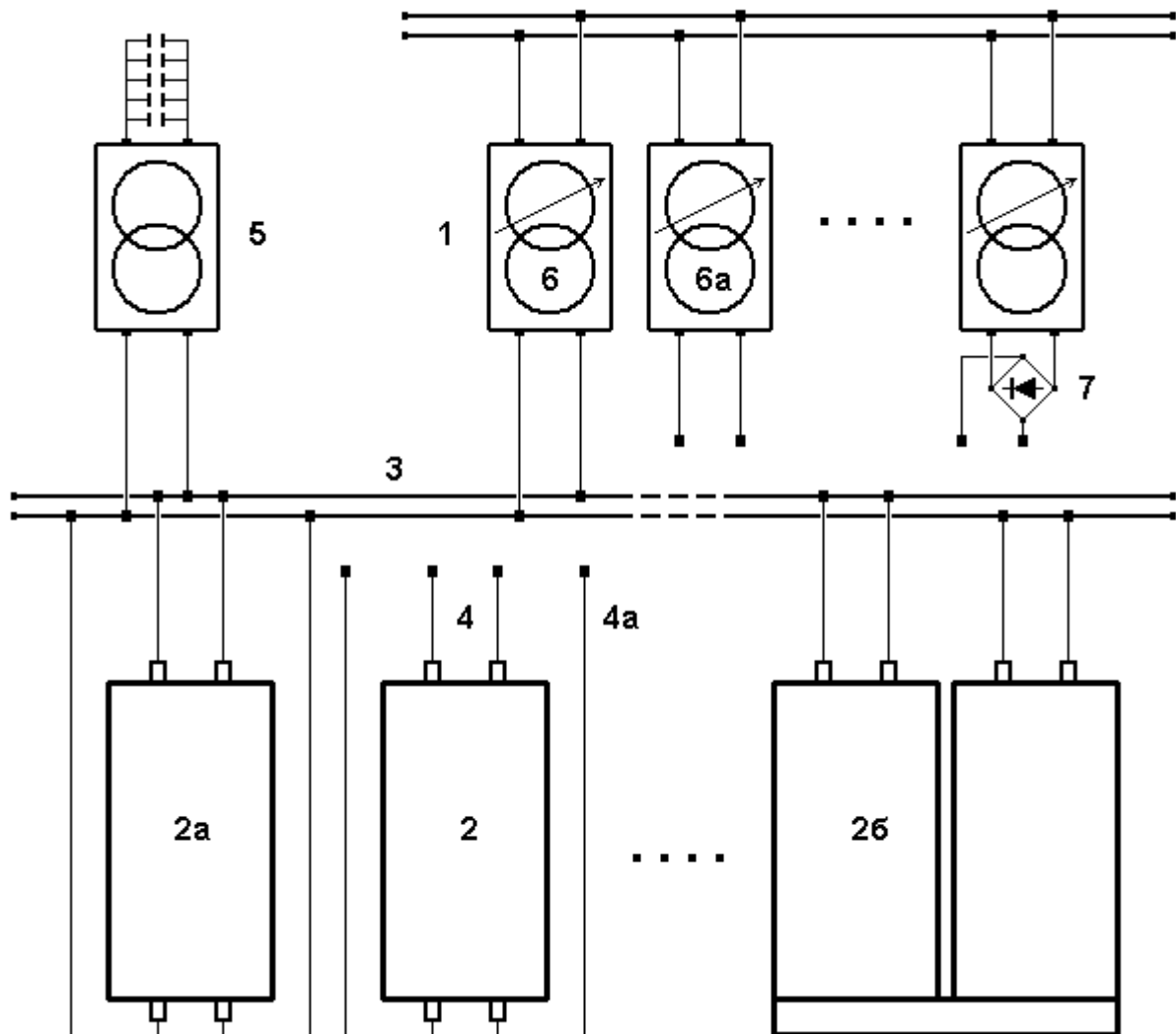


Рис. 1.3. Схема короткої мережі секції графітації

Для забезпечення безперервного завантаження джерела живлення, печі графітації (що мають періодичну дію) об'єднують в секції із спільним головним шинопакетом, до якого під'єднують шини чергової печі 2а, в той час, як інші печі секції остигають, розвантажуються або готуються до нової кампанії графітації.

Існують два основні типи печей для графітації виробів великих розмірів. Печі Кастнера (спосіб запропоновано у 1893 р.), або печі поздовжньої графітації, характеризуються тим, що елементами опору в них виступають безпосередньо електродні заготовки, укладені послідовно в свічу [3]. Вироби в печах Кастнера

розігріваються рівномірно, що дозволяє отримувати продукцію із ступенем графітації, однаково розподіленим по довжині та діаметру. Не дивлячись на це, печі Кастнера досьгодні не знайшли широкого застосування, оскільки потребують використання додаткових технологічних операцій високої складності для забезпечення якісного та надійного контакту між заготовками в активній зоні печі. Передусім необхідна попередня механічна обробка обпалених заготовок для створення правильної циліндричної форми та бажаної чистоти контактних поверхонь в свічі. Крім того, піч повинна мати складну механіку для створення тиску в місцях контакту на рівні 0.4 .. 1 МПа в умовах постійної зміни лінійних розмірів заготовок під час кампанії. Притискний пристрій повинен мати власну систему керування, оскільки зміна лінійних розмірів електродних заготовок має складний характер. В печах Кастнера графітують тільки циліндричні електродні заготовки великого діаметра. Питомі енерговитрати при графітації способом Кастнера складають до 3500 кВт·год на т продукції [24].

Більш поширеними є печі Ачесона (спосіб запропоновано у 1895 р.), в яких електричний струм проходить крізь керн, що складається з електродних заготовок та пересипочних матеріалів. Пересипка в печах Ачесона утворює основний елемент опору, на якому вивільняється близько 98 .. 99 % джоулевої теплоти [3], а електродні заготовки нагріваються кондуктивним шляхом та тепловим випромінюванням від кернової пересипки. Такий спосіб нагрівання створює в печі нестаціонарне, простороворозподілене температурне поле та обумовлює постійну наявність в заготовках градієнта температур (до 1000°C за даними [25]). Через складний характер нагрівання електроди, вироблені в печах Ачесона, мають деяку нерівномірність об'ємного розподілення ступеня графітації. Крім того, градієнт температур викликає термічні напруження в заготовках, що є головним чинником обмеження швидкості нагрівання і збільшує тривалість кампанії (в порівнянні із способом Кастнера). До інших недоліків способу відносять необхідність використання значних об'ємів витратних матеріалів та порівняно низький коефіцієнт корисної дії. Питомі енерговитрати при графітації способом Ачесона складають до 10000 кВт·год на т продукції [17]. Незважаючи на це,

простота реалізації способу і можливість графітувати одночасно велику кількість виробів будь-якої форми та розмірів обумовили широке використання в промислових умовах саме печей Ачесона.

При збільшенні довжини печі графітації Ачесона зростає активний опір керна, що сприяє збільшенню коефіцієнта корисної дії при сталій потужності джерела живлення. Однак із збільшенням довжини печі змінного струму зростає індуктивний опір, що знижує ефект від збільшення довжини. В промисловій практиці використовують печі змінного струму з довжиною керна 4 .. 20 м [17]. При застосуванні джерела живлення постійного струму з тією ж напругою активна довжина керна може бути збільшена більш ніж вдвічі [26, 27]. Загальна довжина великовантажних печей постійного струму сягає 40 м. Печі постійного струму, як правило, мають П-образну форму (поз. 2б на рис. 1.3). П-образну піч, по суті, утворюють дві печі звичайної форми, які розташовано поруч та послідовно з'єднані графітовою перемичкою. Крім збільшення загальної довжини керна, такі печі дозволяють позбавитись пічної петлі (шин, що під'єднують електроди дальнього торця, поз. 4а на рис. 1.3), а, отже, і зменшити втрати короткої мережі. Електричний ККД печей постійного струму на 5.6 % перевищує ККД печей на змінному струмі [28], при цьому активний опір печі постійного струму збільшується на 10 % на початку і до 31 % наприкінці кампанії [20].

Таблиця 1.3

Електричний баланс печей графітації, %

Ділянка печі графітації	Період кампанії	
	початок	кінець
Джерело живлення та регулятор	4.3	3.8
Головний шинопакет	1.0	1.2
Пічні шини	3.9	15.1
Контактні з'єднання	7.5	8.7
Електроди	13.6	18.8
Керн печі (корисна потужність)	69.7	52.4
Вся піч	100	100

В табл. 1.3 за даними [3, 29] та [79] наведено орієнтовний розподіл електричної потужності по ділянкам печей Ачесона звичайної форми під час кампанії графітації.

На рис. 1.4 зображено складові елементи завантаженої печі графітації [1, 3, 17]. Футеровка печі графітації виконується з шамотної цегли і складається з поду 1, торцевих 2 та бокових 3 стін. В деяких печах одна або обидві бокові стіни роблять розбірними. В цьому випадку їх виготовляють з жаростійкого бетону. Стационарні бокові стіни та под печі містять повітряні канали 4 для охолодження футеровки під час кампанії графітації.

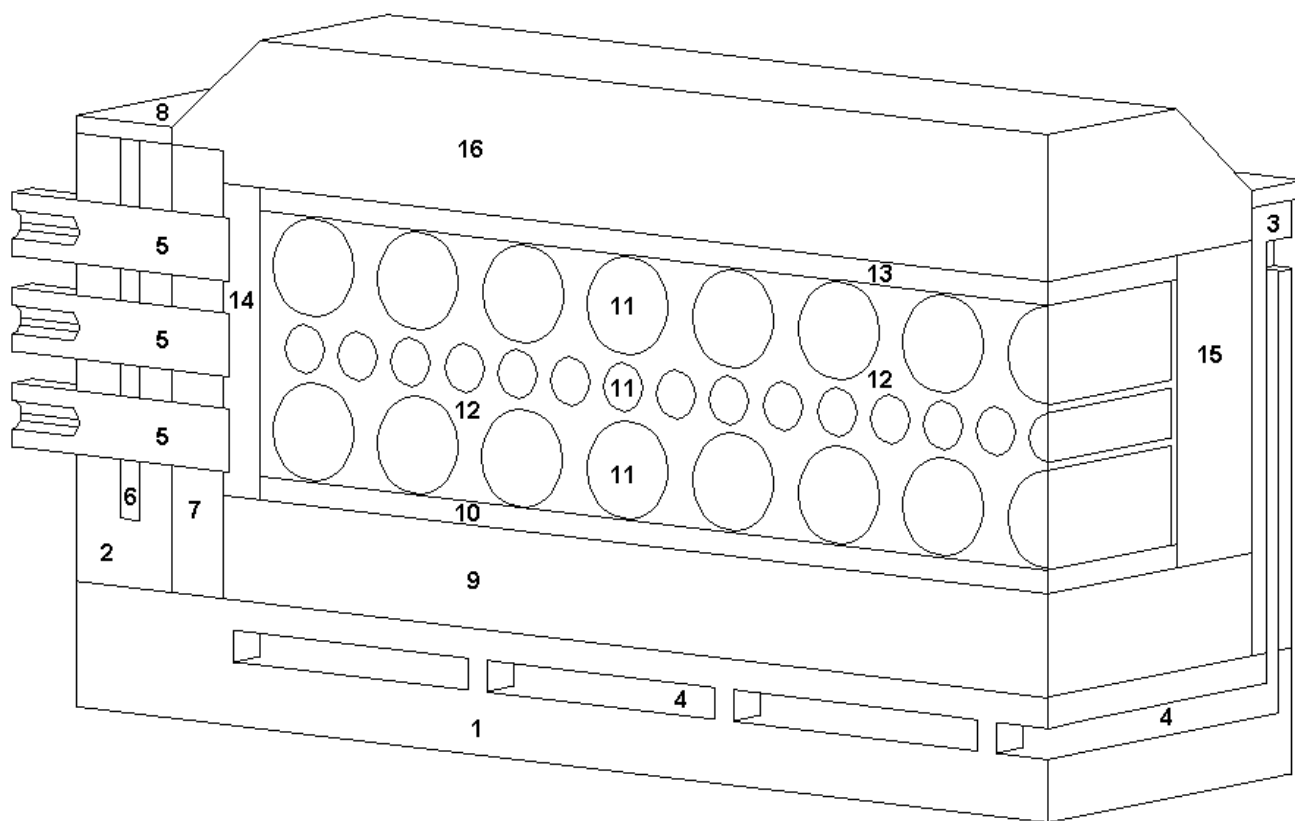


Рис. 1.4. Схема завантаження печі Ачесона

В торцеві стіни печі встановлюють струмопідвідний пакет 5, що складається з графітових електродів, до яких із зовнішньої сторони приєднують пічні шини. Для запобігання окислювання струмопідводного пакета під час кампанії графітації електроди в місцях встановлення герметизують. Для цього в торцевій стіні передбачено порожнину 6, щільно заповнену дрібнодисперсним графітом.

Внутрішню поверхню торцевої стіни захищають екраном 7 з вуглецевих плит або набивної вуглецевої маси товщиною 80 .. 100 мм.

Верхні поверхні стін захищають бетонними плитами 8, на які під час кампанії графітації, встановлюють газовитяжний зонт (на рис. не вказаний).

Після дрібного ремонту піч графітації завантажують для чергової кампанії.

Для цього под печі набивають шаром теплоізоляційної шихти 9 товщиною 500 .. 900 мм. Теплоізоляційна шихта складається з гранульованого коксу фракції 0 .. 10 мм, піску та деревної тирси. Значну частину теплоізоляції може складати зворотна шихта [1, с. 20].

Формують kern печі. Для цього на шар подинної теплоізоляції по периметру майбутнього керна встановлюють тимчасові металеві щити, між якими насипають шар 10 металургійного коксу фракції 10 .. 25 мм. Після цього, перпендикулярно осі печі, завантажують нижній ряд електродних заготовок 11. Задану відстань між заготовками забезпечують за допомогою шаблонів потрібного розміру. Оптимальна відстанню між заготовками горизонтального ряду, за даними [30], складає 20 % діаметру заготовок. Простір між заготовками заповнюють керовою пересипкою 12. Зазвичай пересипку виготовляють з гранульованого металургійного коксу фракції 10 .. 25 мм (при графітації дрібних виробів, наприклад, струмопідвідних щіток, використовують фракцію 5 .. 10 мм [3]). Подібним чином утворюють всі наступні горизонтальні ряди електродних заготовок. Верх керна укривають “ковдрою” з графітованого коксу (зворотної пересипки) 13 товщиною 100.. 150 мм для утворення тимчасового шунта, який перерозподіляє густину струму в перерізі керна на початку кампанії графітації (ПЕО зворотної пересипки в 6 .. 10 разів нижче ПЕО “свіжої” керової пересипки). Визначення оптимальних параметрів бічного шунта печі графітації докладно розглянуто у [147, 155].

Коли kern сформовано, простір між торцевими стінами та металевими щитами заповнюють графітованим коксом 14 для компенсації втрат тепла та для покращення електричного контакту з електродним пакетом. Простір між боковими стінами та металевими щитами набивають теплоізоляційною шихтою,

яка утворює шар бокової теплоізоляції 15. Після цього видаляють металеві щити та формують шар верхньої теплоізоляції 16 товщиною 500 .. 800 мм.

Інколи, з метою зменшення енерговитрат на випаровування вологи з теплоізоляційної шихти, вздовж металевих щитів, додатково встановлюють щити з волокнистого матеріалу, які відокремлюють kern від бокової теплоізоляції на початковій стадії кампанії графітації [145].

ПЕО кернової пересипки приблизно в 50 .. 100 разів перевищує ПЕО електродних заготовок [31–33]. Тому пересипка є основним елементом опору печі Ачесона (97 .. 99 % активного опору керна [3]). В свою чергу, ПЕО теплоізоляційної шихти в 20 .. 100 разів перевищує ПЕО пересипки [34], що надає теплоізоляції печі також і електроізоляційні властивості.

Суттєвий вплив на перебіг процесу графітації має вологість сипких матеріалів печі. Цей показник дуже нестабільний і може змінюватись в широкому діапазоні: 4 .. 16 % і більше [10] в керновій пересипці та до 20 % [35] в теплоізоляційній шихті (через використання вологої зворотної шихти). Наявність вологи в матеріалах завантаження істотно змінює їх електро- та теплофізичні властивості. Крім того, на випаровування вологи (яке має складний характер) витрачається додаткова енергія.

За даними [10] попереднє сушіння сипких матеріалів з економічної точки зору недоцільно, але бажано для забезпечення стабільності режиму нагрівання. Відоме рішення [36], при якому сушіння сипких матеріалів здійснюється в коробі, встановленому на печі графітації під час її остигання.

Завантажену піч під'єднують до витяжної магістралі та головного шинопакета и вмикають джерело живлення. Kern печі розігрівають із регульованою швидкістю до температур, при яких вироби набувають бажаний ступінь графітації (на периферії керна температура може перевищувати 2600°C [37]). При цьому швидкість розігріву обирають так, щоб унеможливити утворення дефектів в об'ємі та на поверхні виробів внаслідок температурних напружень [3]. Зміну потужності печі здійснюють шляхом перемикання ступенів напруги на автотрансформаторі джерела живлення (поз.1 на рис. 1.3). Коли струм печі

підвищується до максимального (для даного джерела живлення) значення, досягнуту величину підтримують на постійному рівні до закінчення кампанії [1].

Для безпосереднього керування процесом графітації використовується технологічне обладнання, вказане на рис. 1.5. Тут зображено загальну схему об'єкту керування, який розглядається, як комплекс обладнання, що містить власне піч графітації, джерело живлення, коротку мережу, а також контрольні прилади та органи керування.

Для ведення процесу використовуються електровимірювальні прилади: вольтметр 1, амперметр 2, ватметр 3 та лічильник активної і реактивної енергії 4. Для регулювання вторинної напруги автотрансформатор джерела живлення обладнано системою телемеханіки 5. Крім того, джерело живлення, як правило, споряджено перемикачем схеми комутації обмоток кожного з трансформаторів 6. Система повітряного охолодження футеровки печі графітації має шибер 7 для під'єднання до витяжної повітряної магістралі.

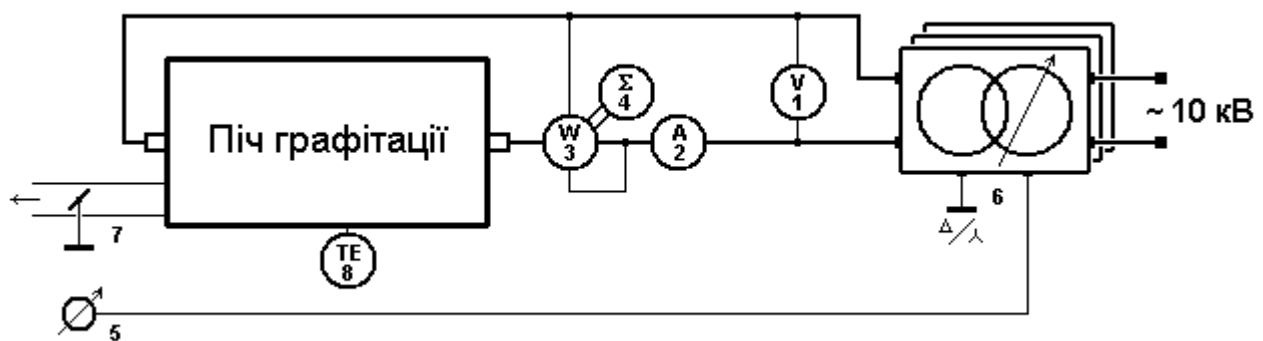


Рис. 1.5. Приладове забезпечення печі графітації

На деяких печах можуть бути встановлені прилади контролю температури 8. Найчастіше контролюється температура футеровки та газовитяжного зонта, але існує принципова можливість контролю температури у внутрішньому просторі печі.

1.5. Аналіз інформаційного забезпечення процесу графітації в печах

Ачесона

Основним параметром, що визначає перебіг процесу графітації, є температура [2]. Швидкість підвищення температури визначає ефективність процесу: якість виробів та витрати електроенергії [3]. Максимально досягнутий рівень температур в “найхолодніших” точках виробів визначає тривалість кампанії. А максимально досягнутий рівень температур на межі теплоізоляція – футеровка впливає на строк служби будівельних конструкцій печі.

Визначення температури у внутрішньому просторі печі графітації - це надзвичайно складна технічна задача. Серед чинників, що ускладнюють контроль, головними є високі рівні температур (в деяких місцях керна температура перевищує 3000°C), значні геометричні розміри об'єкту (складність розташування датчиків в контрольних точках при прямих методах вимірювання), агресивна атмосфера внутрішнього простору (вуглець при високих температурах виступає активним відновником, наявність газів з великим вмістом сірки та кремнію тощо), постійна усадка об'єму завантаження, вплив потужних електромагнітних полів, забрудненість повітря вуглецевим пилом тощо.

1.5.1. Дилатометричний метод [38] засновано на порівнянні лінійного подовження дилатометричного тіла та графітованого стрижня при нагріванні. Дилатометричні датчики градуують в лабораторних умовах. Вони мають задовільну точність ($\pm 15^\circ\text{C}$) і працюють в широкому діапазоні температур (800 .. 3000°C). Довжина промислових дилатометричних датчиків не перевищує 1.3 м, тому для використання в печах графітації такі датчики треба виготовляти індивідуально.

Широкого застосування дилатометричний метод не набув через надзвичайно низьку механічну міцність датчиків (особливо великої довжини), які не можуть працювати в умовах активної усадки об'єму завантаження печі.

1.5.2. Пірометричний метод [10, 3] передбачає використання графітової труби з днищем, що є точкою візира. Трубу встановлюють в піч через отвір в футеровці так, щоб розташувати днище труби безпосередньо в контрольній точці. Вимірювання здійснюють за допомогою яскравісного пірометра.

При високих температурах, внаслідок окислювання, в оптичному каналі труби утворюється димний газ, що унеможлиблює подальше вимірювання. Для забезпечення реєстрації температури впродовж всієї кампанії та підвищення точності вимірювань оптичний канал звільняють від димних газів допоміжними засобами: примусовою вентиляцією, природною тягою, продувкою інертним газом або створенням надлишкового тиску інертного газу в порожнині труби. Використання допоміжних пристроїв значно ускладнює вимірювання та підвищує їх вартість. Відоме рішення, при якому неокисне середовище з надмірним тиском утворюється у візирній трубі природним шляхом [39].

Перевагою методу є можливість його застосування в широкому інтервалі високих температур (800 .. 4000°C [40]). До недоліків відноситься порівняно низька точність (до рівня 1800°C похибку оптичних засобів контролю оцінюють в $\pm 50^\circ\text{C}$, при більш високих температурах похибка може перевищувати $\pm 100^\circ\text{C}$). Крім того, зона встановлення візирної труби обмежена її конструкцією (занадто масивна труба охолоджує контрольну точку і спотворює результати, але недостатня міцність труби підвищує ризик її руйнування внаслідок усадки об'єму завантаження та зовнішнього підгоряння). Як правило [38, с. 20–22], пірометричний метод застосовують тільки для контролю температури периферії керна.

1.5.3. Визначення температури за допомогою термопар. Термоелектричні перетворювачі мають просту конструкцію, високу надійність та низький показник теплової енергії [41]. За допомогою термопар можна вимірювати температуру в широкому діапазоні (в залежності від матеріалу термоелектродів: $-270 \dots +2500^\circ\text{C}$) з високою точністю перетворення. Метод дозволяє використовувати датчики довжиною до 20 м.

Для середньотемпературних вимірювань (до 1000°C) в печах графітації широко застосовують хромель-алюмелеві (ХА) термопари, оскільки вони мають майже лінійну термоелектричну характеристику, високу жаростійкість та низьку вартість. Точність вимірювання ХА-термопарами складає $\pm 4^\circ\text{C}$ для температур до 300°C, та $\pm 1\%$ для більш високих температур [42].

Для вимірювання більш високих температур найчастіше використовують вольфрам-ренієві (ВР) термопари різних градувань. В нейтральному середовищі ВР-термопари здатні вимірювати температуру до 2500°C. При використанні ВР-термопар в агресивному середовищі печі графітації температурний діапазон їх застосування обмежено жаростійкістю захисного керамічного кожуха. Захисна кераміка на основі окису алюмінію має межу стійкості 1600 .. 1700°C [38]. Існує захисна кераміка, межа стійкості якої сягає 2200°C (наприклад, на основі нітриду бору), але через високу вартість широкого застосування в графітовому виробництві такі термопари не набули. Точність вимірювання ВР-термопарами складає 4 %.

Оскільки робочий діапазон температур печі графітації значно перевищує діапазон застосування термопар, метод, здебільшого, застосовують при експериментальних дослідженнях початкової стадії кампанії. При цьому термопари використовуються тільки один раз (вимірювання здійснюють до моменту їх руйнування), що значно підвищує вартість таких досліджень. В промисловій практиці термопари можуть використовуватися для контролю температури футеровки печі, або, як допоміжний засіб в непрямих методах контролю.

1.5.4. Непрямі методи визначення температури засновані на розташуванні в просторі печі графітового тепловода так, щоб його робочий кінець знаходився в контрольній точці, а інший кінець було спрямовано в напрямку футеровки печі. Вимірювання температури в декількох точках “холодної” частини тепловода за допомогою термопар дозволяє визначити температуру робочого кінця.

В роботі [43] інший кінець тепловода підтримують при постійній температурі примусовим охолодженням, а температуру робочого кінця визначають за допомогою номограми, розрахованої до 2400°C. Точність метода невідома.

В роботі [44] температуру робочого кінця T_0 розраховують за експоненціальною залежністю (1.2), а межа застосування методу обмежена тільки працеспроможністю термопар в місцях їх встановлення в тепловоді. Точність вимірювань залежить від кількості точок контролю (їх кількість поступово зменшується при виході з ладу термопар через надмірне підвищення температури в місцях встановлення). Середня похибка методу в області високих температур складає 10 .. 20 %.

$$T(x) = T_0 \cdot \exp(-A \cdot x); \quad (1.2)$$

де x – відстань від робочого кінця тепловода до проміжної точки (тобто точки встановлення термопар, див. рис. 1.6);

$T(x)$ – вимірене значення температури в точці з координатою x , °C;

A – коефіцієнт, що визначається з регресійного аналізу.

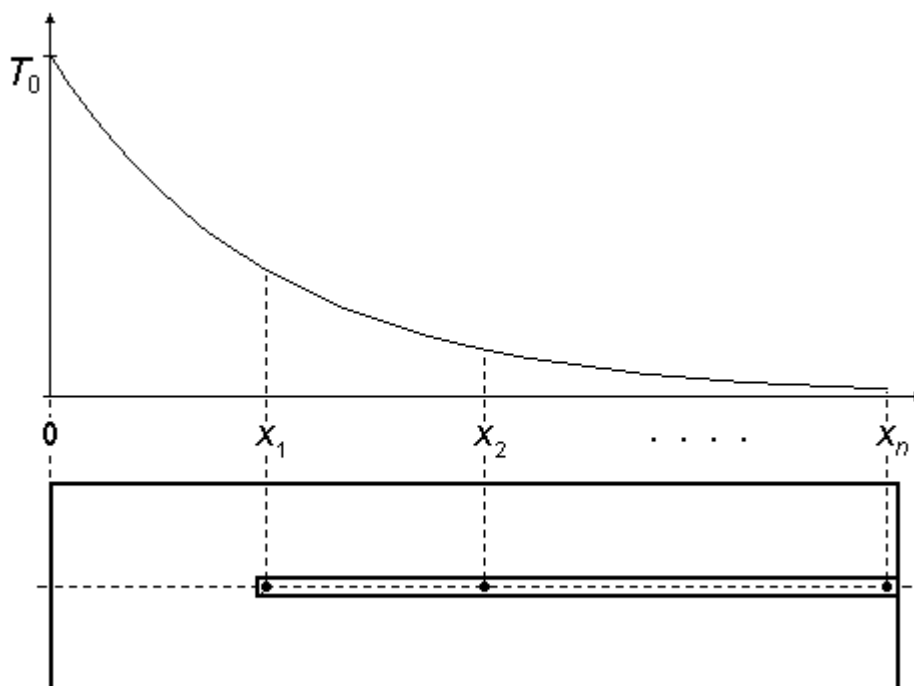


Рис. 1.6. Розподіл температури у вимірювальному тепловоді

Метод можна застосовувати для контролю температури периферії керна практично до закінчення кампанії графітації.

1.5.5. Сигнальний метод [45] будується на використанні плавкого датчика, який встановлюють в контрольній точці печі. Датчик споряджено механічним перетворювачем та з'єднано із жаростійким хвильоводом, інший кінець якого знаходиться за межами печі. Механічний перетворювач виконано, як тягар, підвішений безпосередньо на чутливому елементі плавкого датчика в закритому циліндрі. При досягненні температурою в контрольній точці заданого рівня (температури плавлення чутливого елемента) спрацьовує механічний перетворювач. Факт спрацьовування визначається шляхом аналізу акустичного сигналу у хвильоводі за межами печі. Точність визначення температури сигнальним методом оцінюється в 15 %. Метод дозволяє сигналізувати про досягнення заданого рівня температури в будь-якій контрольній точці печі, де можна встановити плавкий датчик і може використовуватися для оціночного аналізу температурного стану керна.

1.5.6. Розрахункові методи. Всі наведені методи дозволяють (з тою чи іншою точністю) визначати температуру в контрольних точках печі, але оскільки температура дуже нерівномірно розподілена у великому об'ємі, навіть значна кількість контрольних точок не може характеризувати температурне поле печі в повному обсязі. Крім того, застосування більшості методів обмежено технологічними особливостями процесу графітації та високою вартістю застосування. Вказаних недоліків позбавлені розрахункові методи.

В роботі [46] запропоновано визначати середню температуру виробів в печі графітації для будь-якого моменту кампанії графітації за результатами вимірювання кількості підведеної (на цей момент часу) енергії та розрахунку безрозмірної температури (за отриманим авторами залежностям з врахуванням числа Фур'є). Метод дозволяє оцінювати загальний енергетичний стан об'єкта,

але непридатний для оцінювання розподілу температури в об'ємі печі.

Визначити температуру в будь-якій точці печі графітації можна шляхом розрахунку температурного поля за допомогою математичної моделі, що враховує геометричні розміри об'єкту, теплофізичні властивості матеріалів та поточні витрати енергії на графітацію.

1.6. Аналіз існуючих моделей процесу графітації

В роботах [47, 48] розглянуто моделювання струморозподілу в системі піч графітації – шинопакет. Модель представлено у вигляді еквівалентної схеми заміщення. Методику призначено для розрахунку індуктивності керна та короткої мережі при проектуванні ошиновки печей графітації. Для оцінки енергетичного стану модель непридатна.

В роботі [49] досліджено явище розтікання струму у вуглецевих виробках. Модель електричного поля окремого зразка в печі постійного струму отримано в аналітичній формі методом аналогії (з електростатичним полем). Адекватність моделі перевірена експериментально та зроблено висновок про відсутність впливу неоднорідності вуглецевого матеріалу зразка на характер розтікання струму.

В роботі [50] запропоновано в спрощеній аналітичній формі визначати розподіл густини струму в міжрядовій пересипці. За результатами моделювання зроблено висновок про нерівномірність виділення теплоти на поверхні заготовок, що зумовлює неодночасне протікання графітації і, як наслідок, неоднорідність властивостей в об'ємі заготовок.

В роботі [51] зроблена спроба оцінки перепадів температур в керні печі на заключній стадії кампанії графітації, яку автори вважають стаціонарною (стале розподілення температури в керні). Для цього введено спрощуючі припущення про однорідність електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження по всьому об'єму печі, однорідність розподілення в керні внутрішнього джерела теплоти, та про циліндричну форму керна (діаметр циліндра дорівнює ширині керна). Модель температурного поля представлено у

вигляді стаціонарного одновимірного рівняння теплопровідності і розв'язується в аналітичній формі. Модель можна застосовувати тільки для орієнтовного розрахунку рівноважного перепаду температур керна, що в промисловій практиці не має місця.

В роботі [52] досліджено температурне поле електродної заготовки в керні печі графітації. Модель поля представлено рівнянням теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти та крайовими умовами. Розв'язання задачі здійснено на фізичній моделі (експериментальній печі) за допомогою критеріїв подібності методом інтегральної аналогії. Розподіл густини струму в перерізі керна визначається за допомогою спрощеної аналітичної залежності.

В роботі [53] розглянуто методику моделювання температурного стану печі графітації на аналогових обчислювальних машинах. Просторова динамічна модель базується на розв'язанні електро-термічної задачі. В об'ємі керна печі виділено симетричний розрахунковий фрагмент (РФ) спрощеної геометрії з гомогенними властивостями. Електромагнітне поле РФ описано системою стаціонарних диференціальних рівнянь Лапласа. Температурне поле РФ описано системою нелінійних рівнянь теплопровідності з крайовими умовами 1-го та 3-го роду. Задача розв'язується в сітковій формі методом контурної апроксимації з використанням електротеплової аналогії. Модель дозволяє визначати приблизне температурне поле заготовок з перерізом прямокутної форми в печі графітації і, на думку авторів, може застосовуватися при розрахунках футеровок печей графітації та для оптимізації товщини шару бокової теплоізоляції.

В роботі [54] на основі диференціального рівняння енергії для одновимірного теплового потоку запропоновано модель нагрівання заготовок до температури 1500°C. Модель розв'язується в скінченних різницях сітковим методом. Густина тепловиділення в області пересипки вважається відомою, а в області заготовки внутрішнє джерело теплоти відсутнє. Модель призначено для орієнтовних розрахунків градієнту температур в заготовках.

Через значні спрощення розглянуті моделі мають низьку точність відтворення реальних процесів і можуть використовуватися лише для наближеного аналізу температурних полів печі графітації.

В роботі [55] розглянуто спосіб електромоделювання нестационарного температурного поля твердого тіла з крайовими умовами 3-го роду, заснований на методі елементарних балансів. Тверде тіло апроксимують множиною елементарних паралелепіпедів, для кожного з яких складається рівняння балансу енергії. Розв'язання моделі здійснюють за допомогою електричної схеми, зібраної у вигляді сітки відповідно до закону Кірхгофа так, щоб відтворити в кожному з вузлів аналог теплового балансу для відповідного елементарного паралелепіпеда.

Ідеї метода елементарних балансів застосовані при моделюванні температурного поля печі графітації в роботах [1, 56, 57]. Модель тут будується на основі аналізу симетричного РФ, що представлено складеним твердим тілом, в якому електро- та теплофізичні властивості структурних елементів мають суттєву залежність від температури. Температурне поле фрагменту описується системою диференціальних рівнянь теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти, початковими та крайовими умовами. Для кращої збіжності метода та зменшення обсягу розрахунків, циліндричну форму електродних заготовок замінено на прямокутну із збереженням оригінального об'єму заготовок. При цьому зміна відстані між заготовками враховується поправочними коефіцієнтами, визначеними з умови збереження маси заготовок та пересипки. Для розв'язання задачі розподілення густини струму в сітці РФ прийнята електротехнічна схема заміщення, що розраховується по формальним правилам для всіх горизонтальних (паралельних) рядів заготовок на кожному часовому кроці.

Описану модель вдосконалено в роботі [38]. Для зниження похибки відтворення експериментальних даних в області високих температур (вище 2800°C) ефективна теплоємність вуглецевих матеріалів завантаження печі замінена на дійсну, а енергію, що витрачається на сублімацію вуглецю, враховано в елементарних балансах тільки як стік теплоти, розрахований за різницею

ефективної та дійсної теплоємності (при 3000°C ефективне значення перевищує дійсне в 1.2 .. 1.5 разів).

Розглянуті моделі призначено переважно для дослідження теплової роботи печей графітації при існуючих регламентах підведення потужності. Оскільки форма електродних заготовок в моделях суттєво відрізняється від форми їх фізичного прототипу, важко робити висновки про дійсне значення градієнту температур в об'ємі заготовок, тим більше, неможливо застосовувати моделі при аналізі термопружного стану виробів. Крім того, моделювання засновано на сіткових алгоритмах [58, 59], які не дозволяють якісно враховувати крайові умови на поверхнях складної форми, а значний час розрахунку обмежує використання моделей в системах керування.

Загальні підходи до моделювання термопружних станів виробів з вуглецево-графітових матеріалів наведено в [5, 60]. Тут розглянуто методики розрахунку термонапружень у вільних циліндрах із анізотропного вуглецевого матеріалу з врахуванням залежності фізико-механічних властивостей матеріалу від температури. Модель включає рівняння рівноваги, рівняння сумісної деформації та рівняння закону Гука. Система рівнянь розв'язується методом Гальоркіна при однорідних крайових умовах. Наведені методики незастосовні для аналізу термопружного стану електродних заготовок в печі графітації, оскільки стосується порожнистих одношарових та тришарових циліндрів.

В роботі [61] розглянута можливість розв'язання теплової задачі та задачі міцності для одиничної заготовки, що рівномірно нагрівається. При цьому прийнято спрощуючі припущення про симетричний відносно осі і однаковий за довжиною розподіл температури в заготовці (тобто тепловий потік в заготовці спрямовано виключно в радіальному напрямку та напружений стан заготовки є пласко-деформованим). Розрахунок нестационарного температурного поля в заготовці здійснено методом прогонки для неявної скінченно-різницевої схеми [62, 63]. На підставі розрахунку напружень в середньому перерізі заготовки автори роблять висновок про можливість скорочення процесу графітації більш, ніж у 10 разів при рівномірному розігріві керна. Такий характер розігріву в печах

Ачесона неможливий і помилковість висновків авторів, що базується на нереальних спрощуючих припущеннях, доведена численними експериментами [13, 37, 64–66]. Незважаючи на це, цінність роботи полягає в тому, що результати моделювання підтвердили принципову можливість суттєвої інтенсифікації процесу графітації на основі аналізу термопружного стану заготовок в печах графітації.

Для адекватного відображення процесів, що відбуваються в печі, за допомогою моделей необхідно знати електро- та теплофізичні властивості матеріалів завантаження як функції температури.

Дослідженню властивостей вуглецевих матеріалів присвячено чимало публікацій, наприклад [67–73], але тільки в деяких, наприклад [2, 74–77], розглянуто залежність властивостей від температури в широкому діапазоні. При цьому практично відсутні дослідження властивостей сипких матеріалів на основі гранульованого вуглецю при високих температурах (до 3300°C). В роботі [78] розглянуто зміну коефіцієнту теплопровідності різних типів теплоізоляційної шихти та пересипки тільки до температури 1600°C. В роботі [79] досліджено тепло- та електропровідність пересипки на основі гранульованого коксу до температури 2200°C. В роботі [80] приблизні температурні залежності властивостей матеріалів завантаження для всього температурного діапазону графітації отримано на основі узагальнення літературних даних та шляхом розв'язання зворотної задачі теплопровідності при відомому температурному полі з подальшою екстраполяцією в область високих температур.

В роботі [38] зазначено, що питомий опір пересипки від кампанії до кампанії змінюється непередбачувано (навіть при однаковій рецептурі пересипки та однаковому регламенті розкид електричного опору печі для того ж періоду різних кампаній може сягати 15 %). Тому дані, отримані з літературних джерел, можуть розглядатися тільки як перше наближення при ідентифікації об'єкту і потребують подальшої адаптації. Наприклад, в роботі [38], для досягнення збігу результатів моделювання з експериментальними даними здійснюється ручна корекція ПЕО пересипки, а в роботі [35], крім корекції ПЕО пересипки,

здійснюється також корекція коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційної шихти.

1.7. Аналіз способів керування процесом графітації в печах Ачесона

Відомо [3], що непродуктивні витрати теплоти тим менші, чим швидше відбувається розігрів керна печі графітації (більша частка енергії витрачається на нагрівання виробів). Всі способи керування в тій чи іншій формі реалізують ідею прискореного підведення потужності (а, отже, і розігріву керна печі) при гарантованому забезпеченні цілісності виробів.

1.7.1. Керування за електротехнічними параметрами.

Традиційний спосіб засновано на припущенні, що температура керна знаходиться в прямій залежності від кількості енергії, підведеної до печі [3]. 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 графітації. В доповнення до розглянутого способу практикують вимірювання температури периферії керна для уточнення моменту припинення кампанії графітації.

Регламент графітації електродної продукції кожного типу розробляють експериментально на основі тривалої практики або розраховують приблизно за допомогою математичної моделі температурного поля для кожної окремої конструкції печі графітації. При цьому береться до уваги той факт, що скорочення тривалості кампанії означає зменшення тепловтрат та підвищення ефективності процесу графітації, але пришвидчення розігріву керна збільшує нерівномірність температурного поля в об'ємі заготовок, що збільшує термонапруження [13].

Швидкість розігріву обмежують так, щоб, за відсутності достовірної інформації про температурний стан керна, 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.

1.7.2. Керування за температурою футеровки.

Керування процесом графітації шляхом зміни напруги печі в залежності від кількості підведеної енергії можна доповнювати зміною режиму охолодження футеровки (рис. 1.5). Для цього необхідно організувати визначення температури футеровки впродовж кампанії [81].

В роботі [82] запропоновано швидко нагрівати kern до досягнення температури в області футеровки $800 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ (що відповідає межі термостійкості матеріалу футеровки), а потім примусовим охолодженням запобігати розігріву футеровки до небезпечних температур. При цьому заготовки розігріваються до більш високих температур (на межі керна з теплоізоляцією температура може сягати $2800 \dots 3000^{\circ}\text{C}$), що сприяє підвищенню якості кінцевої продукції. Використання додаткового керування, на думку автора, дозволить скоротити тривалість кампанії та час охолодження печі, а також істотно зменшити витрати теплоізоляційної шихти.

Цей спосіб не має широкого вжитку, оскільки, як зазначено в [83], на великовантажних печах максимум теплового навантаження на футеровку печі графітації припадає на час після припинення підведення потужності. Крім того, в таких печах повітряне охолодження практично не впливає на розподіл енергії в керні, а інтенсивність охолодження футеровки, при під'єднанні системи охолодження до витяжної магістралі збільшується тільки на 1.45 %. Головним недоліком способу є висока імовірність руйнування заготовок внаслідок термонапружень, що виникають при швидкому неконтрольованому розігріві керна. В промисловій практиці охолодження вмикають на початку кампанії графітації і вимикають після охолодження печі.

1.7.3. Керування за досягнутою температурою керна.

Більш точний метод ведення процесу графітації та його припинення засновано на безпосередньому вимірюванні температури керна кечі.

В роботі [13] запропоновано змінювати швидкість підведення потужності по зонам, що характеризуються рівнем досягнутих температур. Автори розділяють процес графітації на зони: до 1000°C , $1000 \dots 2000^{\circ}\text{C}$ та вище 2000°C , причому в другій зоні швидкість розігріву доцільно зменшувати. Конкретні рекомендації щодо швидкості розігріву визначаються експериментально для кожного типу продукції.

Аналогічні висновки зроблено в [84], де перша зона, яка знаходиться в області температур до $1000 \dots 1200^{\circ}\text{C}$, дозволяє швидке підведення потужності без ризику утворення дефектів в заготовках. В другій зоні, що відповідає діапазону температур $1000 \dots 1700^{\circ}\text{C}$, відбуваються значні зміни лінійних розмірів заготовок і швидкість треба істотно обмежити (до $22 \dots 25^{\circ}\text{C} / \text{год}$). В третій зоні, коли температури перевищують 1700°C , через значне збільшення теплопроводності виробів, утворення критичних термонапружень малоімовірно і швидкість нагрівання можна знов підвищити.

Спосіб в промислових умовах не застосовується, оскільки визначення температури вище 1500°C є серйозною технічною проблемою (п.р. 1.5). Крім того, значна нерівномірність розподілу температурного поля в заготовках не дозволяє однозначно виділяти температурні зони, а використання усереднених температурних показників робить спосіб неефективним.

1.7.4. Керування за градієнтом температур.

В роботі [52] за результатами моделювання на фізичній моделі запропоновано вести процес графітації по градієнту температур в поперечному перерізі заготовок в залежності від температурної зони. Для заготовок діаметром 315 мм отримано такий регламент підведення потужності: в температурній зоні $0 \dots 900^{\circ}\text{C}$ здійснюється швидкий розігрів з максимальним градієнтом температур $\Delta 440^{\circ}\text{C}$; в зоні $900 \dots 1200^{\circ}\text{C}$ потужність зменшується до значення градієнту

$\Delta 260^{\circ}\text{C}$; це значення градієнту витримується в температурній зоні $1200 \dots 1900^{\circ}\text{C}$; а в зоні вище 1900°C градієнт можна збільшити до $\Delta 380^{\circ}\text{C}$. Перерахунок регламенту для іншого типу продукції здійснюється по відомому регламенту пропорційно відносній зміні діаметру заготовки.

В роботі [85] експериментально визначено градієнти температур, при яких виникає термічне напруження, що перевищує границі міцності матеріалу заготовок діаметром 200 мм. Визначено, що найбільш сприятливою для тріщиноутворення є температурна зона $800 \dots 1500^{\circ}\text{C}$. Для цієї зони запропоновано підтримувати безпечне значення градієнту температур шляхом періодичного переривання підведення потужності (приблизно на 30 хв).

В роботі [54] відзначено, що режим графітації повинен забезпечувати якнайшвидше нагрівання заготовок з термічними напруженнями нижче критичних. За результатами моделювання температурного поля на сітковій моделі визначено, що до температури 1500°C відносний градієнт температур в заготовках не повинен перевищувати $95^{\circ}\text{C} / \text{см}$. При подальшому підвищенні температури зменшується коефіцієнт термічного розширення та зростає теплопровідність, що дозволяє суттєво збільшити швидкість розігріву.

В роботі [86] для розробки раціонального регламента підведення потужності запропоновано в якості критерію, що визначає швидкість підведення енергії, використовувати відносний градієнт температур по радіусу заготовки. При цьому припустимий перепад температури, як функцію температури, визначено шляхом моделювання експериментальної кампанії графітації електродних заготовок того ж діаметру.

Реалізація способу потребує використання адекватної моделі температурного поля печі графітації (п.р. 1.6), що здатна працювати в реальному часі. При цьому критичні значення температурних градієнтів визначаються експериментально для кожного типу продукції. Тому спосіб використовують тільки для корекції існуючих або розробки перспективних регламентів графітації.

1.7.5. Керування за омічним опором.

В [3, с. 86] автори 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.

Спосіб ведення процесу та визначення моменту закінчення кампанії по характеру зміни та досягнутому кінцевому значенню омічного опору печі наведено в [87]. Крім визначення моменту припинення кампанії графітації, 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 по логарифмічному закону.

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 електродних заготовок). Крім того використання узагальнених показників знижує якість керування і потенційно здатне призвести як до перевитрат електроенергії, так і до руйнування виробів.

1.7.6. Керування за сигналами акустичної емісії.

Спосіб базується на аналізі акустичних сигналів, що їх емітує електродна заготовка в термонапруженому стані при виникненні та розвитку дефектів структури [88, 89]. В роботі [38] зазначено, що при досягненні радіального перепаду температур в заготовках рівню, який відповідає границі міцності матеріалу, амплітуда акустичної емісії однозначно відображує утворення тріщин в об'ємі заготовки.

Цей спосіб не застосовують в промисловій практиці, оскільки дотепер не існує методу надійної дешифрації сигналів акустичної емісії до моменту розриву суцільності тіла виробу, крім того, заготовки в печі Ачесона мають різний рівень напруженості а контролювати акустичні сигнали кожної з них практично неможливо.

1.8. Аналіз систем керування печами графітації

Існуючі промислові системи керування процесом графітації в печах Ачесона здебільшого належать до категорії людино-машинних (автоматизованих) і в тій чи іншій формі реалізують метод керування за електротехнічними параметрами (п. 1.7.1). На рис. 1.7 зображено узагальнену схему такої системи, де об'єкт керування – “Піч графітації” представлено всім комплексом пічного обладнання (рис. 1.5). Система керування реалізує наступні функції:

1. Видача технологічних інструкцій щодо формування керна та виконання інших підготовчих операцій.
2. Реалізація підведення потужності до печі графітації у відповідності з наперед заданим регламентом $P_{\text{рег}}$.
3. Реалізація операцій, пов'язаних із забезпеченням обмеження сили струму печі по рівню I_{max} .
4. Корекція регламену при тимчасових перервах підведення струму.
5. Визначення тривалості кампанії графітації (моменту припинення підведення потужності).
6. Видача технологічних інструкцій щодо охолодження та розвантаження печі графітації.
7. Відображення технологічних параметрів та документування процесу.
8. Якщо джерело живлення складається з кількох трансформаторів, то система керування також забезпечує процедуру їх поступового введення в дію.

Головна функція (підведення потужності) здійснюється шляхом вимірювання кількості підведеної енергії для кожного часового інтервалу (що дорівнює часу перехідного процесу печі), порівняння результатів вимірювання із регламентним (заданим) значенням та корекції (за результатами порівняння) рівня потужності для наступного часового інтервалу. Необхідна величина керуючого впливу (напруги печі U), що реалізує регламент підведення потужності, встановлюється шляхом відповідного перемикання (ручного або за допомогою

виконавчого механізму) ступенів трансформатора джерела живлення. Керуючий вплив може корегуватися на кожному часовому кроці у відповідності з величиною зони нечутливості, пов'язаної із кроком виконавчого механізму (величиною ступеня трансформатора) [90].

Крім того, система може корегувати сам регламент на наступний часовий інтервал при досягненні напругою або струмом на об'єкті обмеження по максимальному рівню [91].



Рис. 1.7. Традиційна схема керування піччю графітації

На рис. 1.7, крім основного керування U , зображено лінію дискретних керуючих сигналів D , що спричиняють разові дії на об'єкті. Такими керуючими діями можуть бути: встановлення газовідвідного зонта (впливає на режим охолодження верху печі), під'єднання системи охолодження до витяжної магістралі (впливає на режим охолодження футеровки печі), під'єднання додаткового трансформатора (коли діючі трансформатори не забезпечують потрібний рівень сили струму), перемикання схеми комутації обмоток трансформаторів (впливає на вторинну напругу трансформатора) тощо.

В роботі [153] розглянуто систему керування охолодженням печі графітації, яка дозволяє використовувати потужність витяжної магістралі у оптимальному режимі після від'єднання печі графітації від джерела живлення.



Рис. 1.8. Схема керування піччю графітації за температурою

Для більш точного визначення моменту припинення підведення потужності в піч графітації може бути встановлено термодатчик (рис. 1.8), що визначає рівень температури в контрольній точці (або точках) ядра. Якщо контрольна точка характеризує “найхолодніше” місце ядра, то момент припинення підведення потужності можна визначити шляхом виконання системою відповідної процедури за умови досягнення в контрольній точці кінцевої температури $T_{\max}$ [92].



Рис. 1.9. Схема керування піччю графітації за акустичними сигналами

В [87] запропоновано керувати підведенням потужності за середньою температурою керна, що розраховується за допомогою апроксимуючої залежності по омичному опору (п. 1.7.5), причому коефіцієнти апроксимуючої залежності визначаються на основі вимірювання температури в контрольній точці.

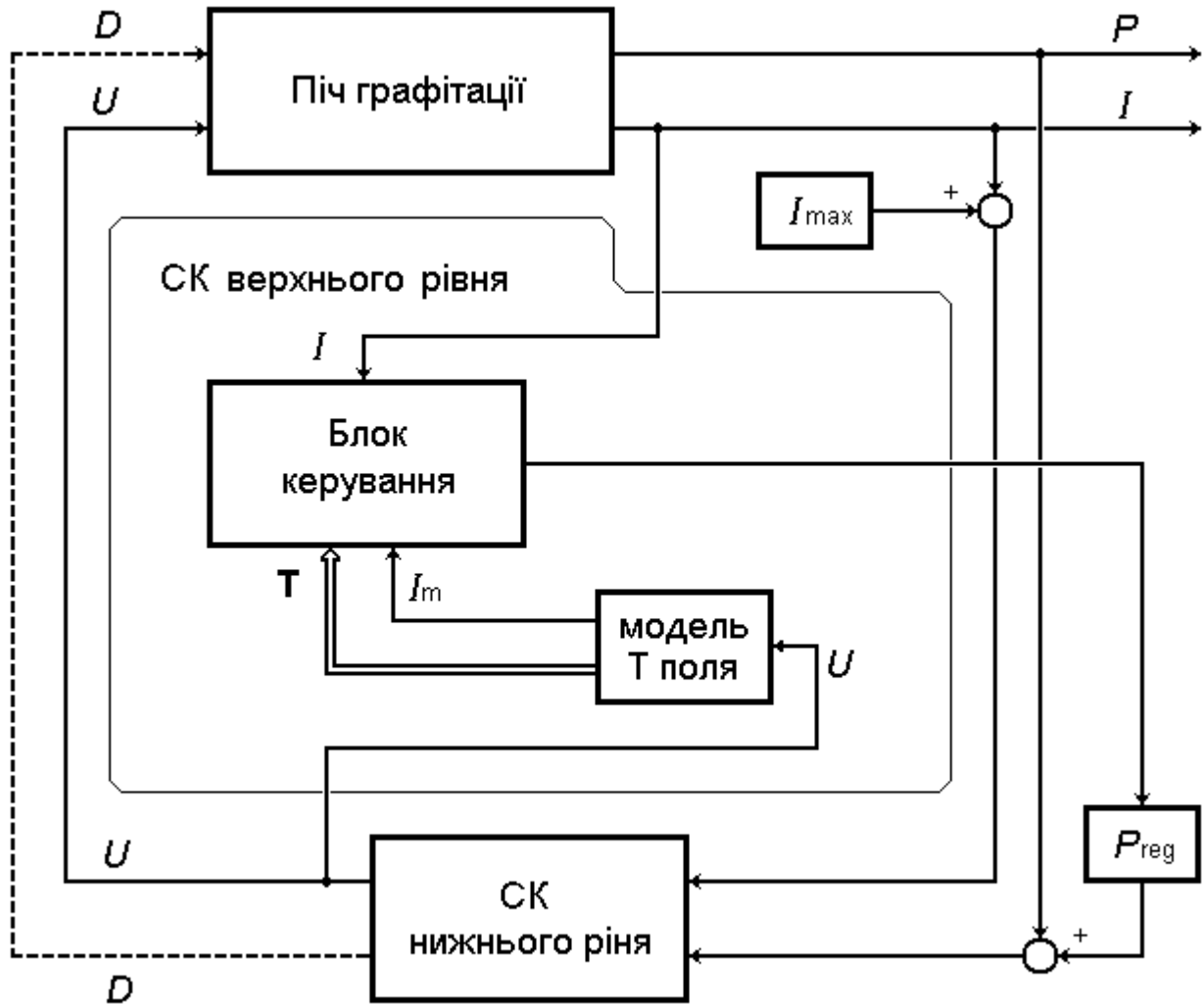


Рис. 1.10. Дворівнева схема керування піччю графітації

На рис. 1.9 наведено узагальнену схему системи керування процесом графітації з використанням сигналів акустичної емісії A (п. 1.7.6). В [93] запропоновано вимірювати сигнали акустичної емісії в хвильоводі, який має контакт із заготовкою, та керувати нагріванням печі так, щоб рівень сигналу акустичної емісії був близьким до критичної величини. В [89] запропоновано визначати момент припинення підведення потужності до печі, використовуючи

інформацію про частоту проходження сигналів акустичної емісії, по емпіричній залежності.

В роботі [94] запропоновано систему автоматичного керування потужністю печі графітації на основі розрахунку поточного градієнту температур в заготовках за допомогою математичної моделі температурного поля T (п. 1.7.4). Така система повинна мати верхній рівень (рис. 1.10), що містить швидку модель температурного поля та на основі поточного енергетичного стану печі корегує регламент графітації P_{reg} , та нижній рівень, що реалізує корегований регламент графітації P_{reg} та виконує інші традиційні функції, притаманні системам керування по електротехнічним параметрам (див. вище).

Всі відомі системи керування (як промислово реалізовані, так і експериментальні) здатні здійснювати процес графітації в печах Ачесона лише на основі опосередкованих оцінок стану виробів під час кампанії і тому не дозволяють істотно підвищити ефективність виробництва великогабаритної графітованої продукції.

1.9. Постановка завдання досліджень

Враховуючи зазначені обставини, завдання дисертаційної роботи сформульовано наступним чином: створити систему керування процесом графітації електродних виробів в печах Ачесона постійного струму, яка сприятиме зменшенню енерговитрат при забезпеченні якості кінцевої продукції завдяки аналізу поточного та прогнозуванню майбутнього термopужного стану виробів та ступеня їх графітації.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних задач.

1. Експериментальне дослідження основних закономірностей процесу графітації та розподілу температурного поля печі під час кампанії.

2. Розробка принципів та критеріїв ефективного керування процесом графітації.

3. Створення математичної моделі температурного поля печі графітації з врахуванням неповної визначеності електро- та теплофізичних параметрів матеріалів завантаження.

4. Створення математичної моделі термопружного стану виробів під час графітації.

5. Розробка методу оцінки ступеня графітації виробів під час графітації.

6. Створення системи керування процесом графітації в печах Ачесона постійного струму, яка забезпечить енергоощадний режим роботи технологічного обладнання та потрібну якість готової продукції.

1.10. Висновки до розділу 1

В результаті аналізу процесу графітації великогабаритної продукції методом Ачесона зроблено наступні висновки.

1. Графітація в печах Ачесона є надзвичайно енергоємним процесом і зменшення енерговитрат на кампанію при забезпеченні високі якості кінцевої продукції є актуальною науковою і технічною задачею.

2. Печі Ачесона постійного струму більш ефективні в порівнянні з печами змінного струму (п.р. 1.4).

3. Якість кінцевої продукції характеризується ступенем її графітації та відсутністю механічних дефектів в об'ємі виробів. Дійсна якість продукції може бути визначена тільки після завершення процесу графітації.

4. Інтенсифікація процесу графітації призводить до зменшення тривалості кампанії графітації, скорочення втрат теплоти і енерговитрат в цілому та до підвищення ефективності всього виробництва.

5. Швидкість розігріву керна печі Ачесона обмежена термічною міцністю виробів, що графітуються.

6. Електрична напруга печі є єдиним істотним керуючим впливом процесу графітації в печах Ачесона.

7. Скорочення тривалості процесу графітації можливе при наявності достовірної інформації про термопружний стан виробів та про ступінь їх графітації під час кампанії.

8. Контроль термопружного стану виробів передбачає створення моделей температурного поля печі та поля механічних напружень виробів. При цьому моделі повинні враховувати непередбачуваний характер зміни електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження печі.

9. Ефективне ведення процесу графітації можливе тільки при існуванні системи керування, що в реальному часі генерує керуючий вплив на основі аналізу поточного термопружного стану виробів.

10. Аналіз сучасного рівня автоматизації виробництва графітованої великогабаритної продукції показав обмеженість промислових методів контролю температурного стану печі у всьому інтервалі робочих температур, ненадійність засобів контролю термопружного стану виробів та відсутність систем керування, здатних ефективно розв'язувати задачу інтенсифікації процесу графітації в печах Ачесона.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ В ПЕЧІ АЧЕСОНА

2.1. Задачі та загальна характеристика експериментальних робіт

З метою виявлення основних закономірностей процесу та визначення характеру розподілу температурного поля в печі Ачесона на підприємстві ВАТ “Український графіт” (м. Запоріжжя) були проведені експериментальні дослідження різних кампаній графітації електродних заготовок діаметром 555 мм у промисловій великовантажній П-образній печі постійного струму при традиційній (трирядовій) схемі пакетування (рис. 2.1) з використанням шунтівного шару з графітованого коксу 4.

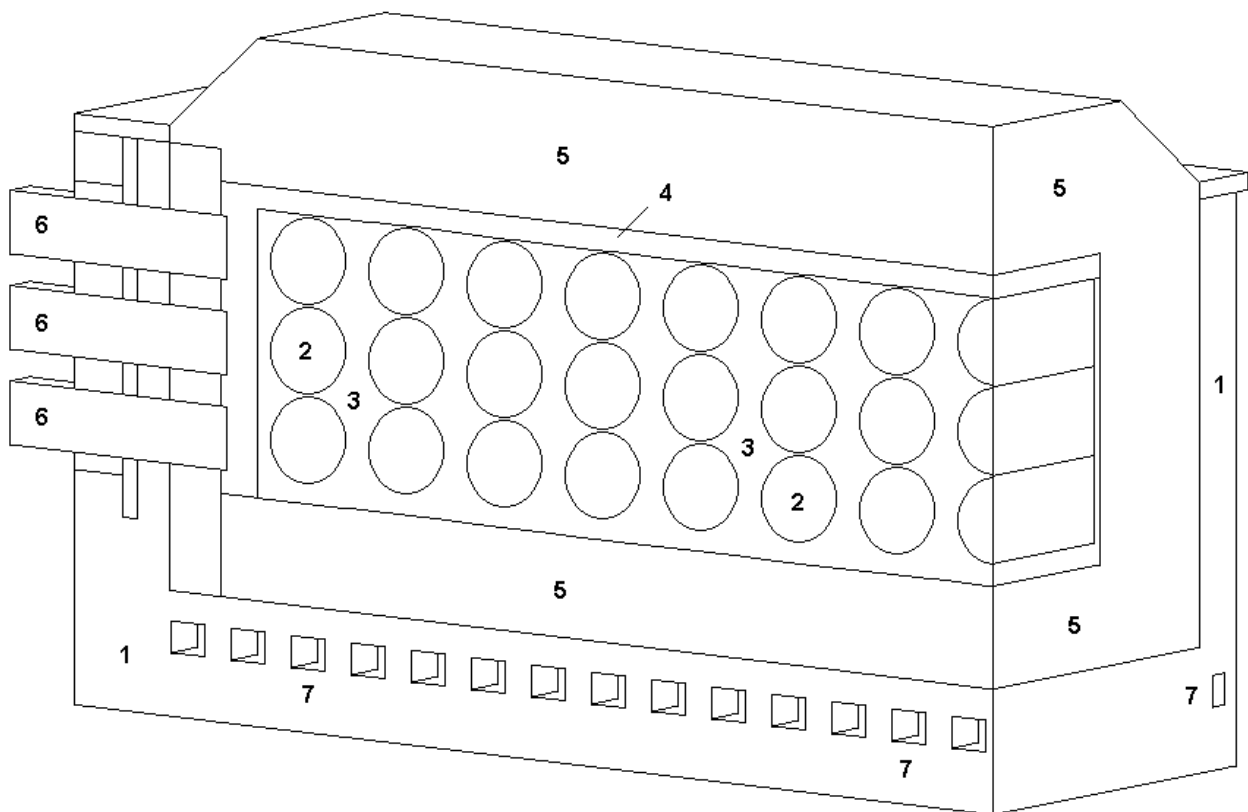


Рис. 2.1. Схема пакетування заготовок діаметром 555 мм

На рис. 2.1 1 – футеровка; 2 – заготовки; 3 – керна пересипка; 4 – шунтівний шар; 5 – теплоізоляційна шихта; 6 – електроди; 7 – повітряні канали.

Внутрішній простір кожної з двох камер П-образної печі має розміри: висота 3.1 м; довжина 11.7 м; ширина 4.2 м, і вміщує 42 електродні заготовки діаметром 555 мм та довжиною 1.9 м при відстані між заготовками в ряді 0.2 м.

Геометричні параметри керна вказано на рис. 2.2.

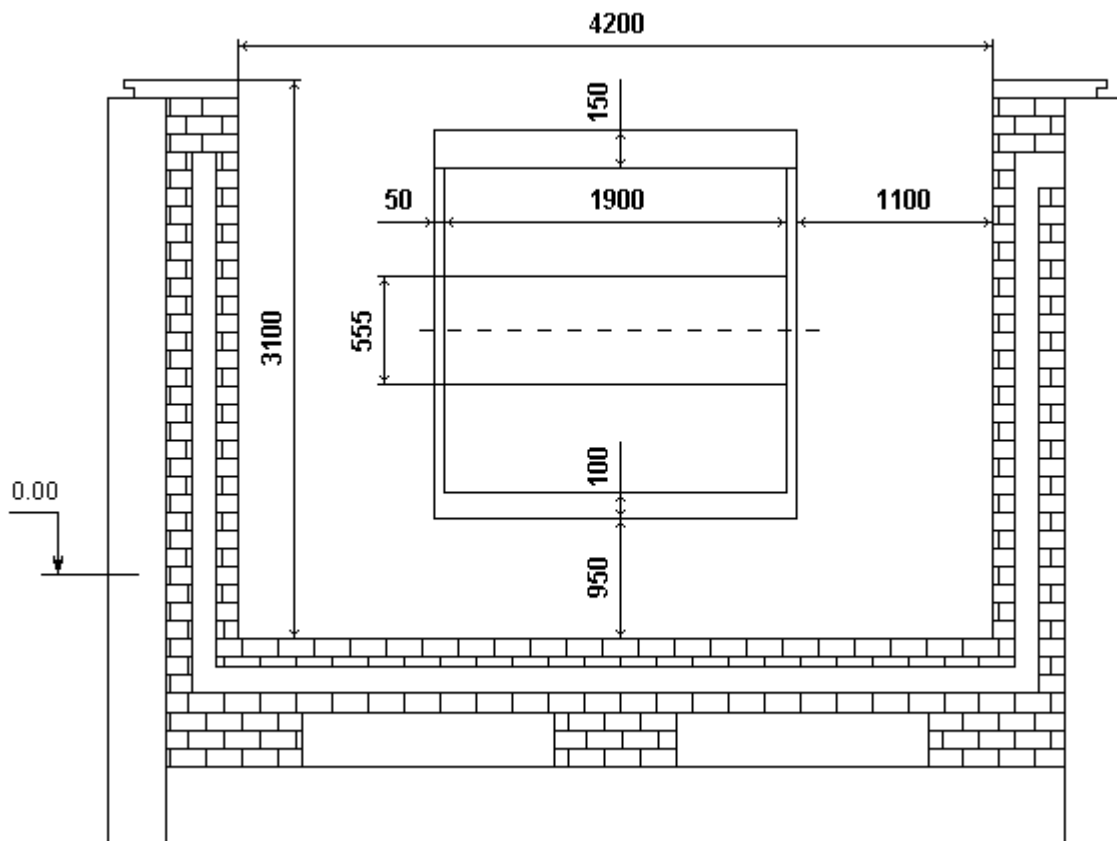


Рис. 2.2. Поперечний переріз камери печі

Під час експериментальних кампаній штатними засобами контролювалися поточні електричні параметри печі: потужність, електрична напруга, сила струму та кількість спожитої енергії (рис. 1.5).

Температура в контрольних точках внутрішнього простору печі визначалась в автоматичному режимі за допомогою термопар (п. 1.5.3) до моменту їх руйнування. При цьому для визначення температури в середині заготовок термопарні збірки укладались в попередньо висвердлені канали.

На пізніх стадіях кампаній температура периферії керна в області верхніх заготовок контролювалась пірометричним способом (п. 1.5.2).

Температура периферії керна в області середніх заготовок контролювалась непрямым методом (п. 1.5.4) з використанням вимірювального тепловода.

Для подальшого порівняльного аналізу експериментальних даних обрано кампанії графітації з ординарним (відповідно до виробничо-технологічної інструкції (ВТІ) підприємства) та з форсованим регламентом підведення потужності.

В обох експериментах система охолодження футеровки печі була увімкнута на першій годині кампанії.

Задачі експериментальних досліджень:

1. Дослідити особливості енергоспоживання піччю графітації.
2. Визначити характер просторового розподілення температурного поля.
3. Визначити закономірності зміни температурного поля печі в динаміці.
4. Оцінити керованість печі графітації.

2.2. Методика експериментальних досліджень

2.2.1. Визначення електротехнічних параметрів.

Похибка вимірювання електричних характеристик процесу визначена за класом точності відповідних приладів контролю [1, с. 42].

Вольтметр М381 “Электрoкoнтaктoр”, 0–600 В, клас точності 1.5.

Кілоамперметр М330 “Прибор”, 0–30 кА, клас точності 1.5.

Мегаватметр (на кожен трансформатор джерела живлення) Д305 “Прибор”, 0–15 МВт, клас точності 1.5.

Лічильник активної електричної енергії А 1200 Alfa 10 MR3T “Elster Metronika ”, клас точності 1.0.

Опір печі визначався розрахунковим шляхом [3, с. 86].

2.2.2. Визначення температури термопарним способом.

Температура в контрольних точках печі визначалась за допомогою автоматичного комплексу збору даних [95], що включає термінал на базі

персонального комп'ютера з портом RS-232, перетворювач інтерфейсів RS-232/RS-485 ICP_DAS i-7520, 8-канальні модулі аналог-цифрового перетворення ICP_DAS i-7018 та термопарні збірки.

Для вимірювання температури до 1100°C виготовлялись збірки ХА-термопар з діаметром електрода 0.5 мм, які захищено сталевим кожухом діаметром 8 .. 10 мм. Для ізоляції електродів використовувалось подвійне обплетення з високотемпературної муліто-кремнеземної нитки.

Для вимірювання температури до 1800°C використовувались збірки ВР5/20-термопар 2-го або 3-го градуювання з діаметром електрода 0.35 та 0.5 мм. Електроди ізолювалися муліто-кремнеземними трубками (соломкою), а збірки захищалися кожухами з карбіду кремнію, внутрішній простір яких заповнено окисом магнію.

Для оцінювання похибки вимірювання температури термоелектричними перетворювачами використана методика, наведена в [38, с. 24–27]. При цьому до уваги взяті наступні чинники:

1. Відхилення положення робочого спаю термопари від передбачуваної контрольної точки в просторі печі внаслідок усадки шихтових матеріалів (до 50 мм) та неточності встановлення датчика (± 20 мм). Попередні експерименти показали, що при таких відхиленнях максимальна похибка в області температур до 1000°C на периферії керна може сягати $\pm 60^\circ\text{C}$.

2. Шунтування термоелектродів через ізоляцію. Відповідно до [42] за цим показником похибка ВР5/20-термопар з ізоляцією на основі окису магнію в області високих температур (до 1600°C) не перевищує $\pm 0.7^\circ\text{C}$. Для ХА-термопар цей чинник не враховується через вузький температурний діапазон їх застосування (до 1100°C).

3. Вплив хімічної корозії термоелектродів. При контакті ВР-термопар з окисом магнію, похибка прийнята $\pm 0.8\%$ [35]. Для ХА-термопар цей чинник не враховується через вузький температурний діапазон їх застосування.

4. Нестабільність хімічного складу термоелектродів. Для ВР5/20-термопар ця похибка складає $\pm 4^\circ\text{C}$, для ХА термопар $\pm 5^\circ\text{C}$ [96, с. 83].

5. Температурна нестабільність градування. За даними [96, 129] відхилення градувальної характеристики ВР5/20- та ХА-термопар з діаметром електродів 0.5 мм після 100 годин роботи при 1000°C не перевищує $\pm 7^{\circ}\text{C}$.

6. Інструментальна похибка вторинного приладу. Основна похибка аналого-цифрового перетворення приладу ICP_DAS i-7018 (24 розряда) складає $\pm 0.1\%$.

7. Похибки, пов'язані з тепловою інерцією термопар за рахунок додаткового термічного опору кожухів та ізоляції не враховані через відносно низьку швидкість зміни температури в керні печі.

Сумарна похибка від вказаних чинників не перевищує 12 % у всьому діапазоні температур.

2.2.3. Визначення температури пірометричним способом.

Для визначення температури периферії керна в області верхніх заготовок в піч графітації при завантаженні встановлювалась візирна труба, виготовлена з графіту відповідно до [39]. Розміри труби вказано на рис. 2.3.

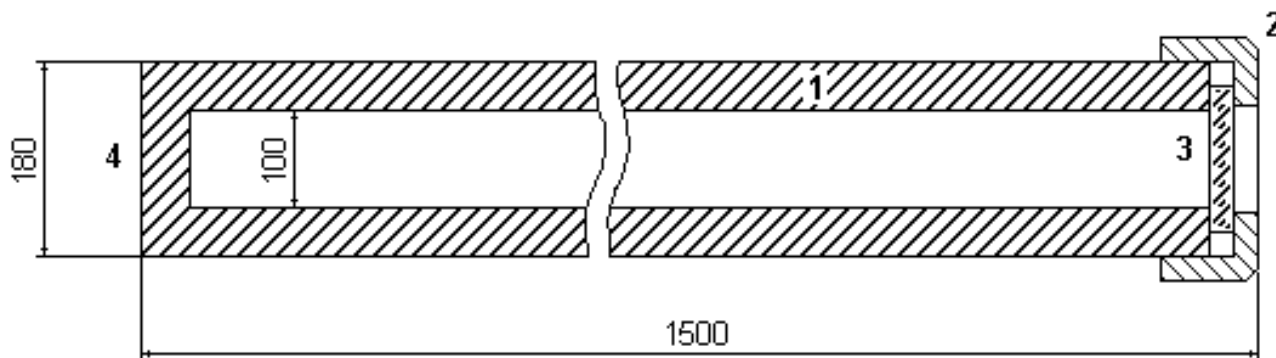


Рис. 2.3. Візирна труба для пірометрії

На рис. 2.3 1 – циліндричний корпус; 2 – кришка з отвором; 3 – жаростійке скло (CaF_2); 4 – робоча поверхня.

Визначення температури поверхні 4 здійснювалось за допомогою яскравісного пірометра “Промінь”, що має три вимірювальні діапазони. Абсолютна похибка визначення яскравісної температури пірометром складає (по

діапазонах): 1) 800 .. 1400 °C – 14 °C; 2) 1200 .. 2000 °C – 20 °C; 3) 1800 .. 3000 °C – 150 °C.

На похибку визначення дійсної температури пірометром впливають наступні чинники:

1. Недостовірні інформація про спектральну випромінювальну здатність матеріалу візирної труби. Для графіту цей показник змінюється від 0.9 при 1000 °C до 0.81 при 3000 °C, але залежить також від стану поверхні.

2. Поглинання випромінювання внутрішнім середовищем візирної труби. За даними [41] при 20 % поглинанні енергії випромінювання в червоному спектрі (0.655 мкм) похибка може сягати 100 °C, хоча в задимленому середовищі (що спостерігається наприкінці кампанії графітації) коефіцієнт поглинання може значно перевищувати 20 %.

3. Охолодження робочої поверхні 4 через корпус 1 візирної труби, оскільки графіт має високий коефіцієнт теплопровідності.

Сумарна похибка від вказаних чинників з урахуванням результатів попередніх експериментів оцінюється в 10 % у всьому діапазоні температур при штатній роботі візирного пристрою [38].

2.2.4. Визначення температури непрямим методом.

Для визначення температури периферії керна в області заготовок середнього ряду в піч графітації при завантаженні встановлювались виготовлені з графіту вимірювальні тепловоди циліндричної форми діаметром 150 мм та довжиною 900 мм. Пристрої виготовлялися з довжиною, меншою ширини шару бокової теплоізоляції для зменшення похибки вимірювання внаслідок охолодження робочої поверхні через тепловід. У внутрішній не наскрізний канал діаметром 12 .. 20 мм закладався термопарна збірка (рис. 1.6). Температура робочої поверхні визначалася розрахунковим шляхом відповідно до (1.2) на основі результатів вимірювання температури в проміжних точках тепловода.

За даними авторів методики [44] похибка визначення температури на робочому кінці тепловода в області 1000°C при використанні чотирьох проміжних

точок складає 4 %, а при використанні трьох проміжних точок не перевищує 6 %. При виході з ладу ближчих до робочого кінця термопар похибка може сягати 20 %.

2.3. Ординарний регламент

Для з'ясування особливостей розподілення температурного поля в просторі печі були проведені температурні вимірювання під час кампанії графітації з ординарним регламентом (рис. 2.4, тут і надалі криві з індексом “о” стосуються цієї кампанії).

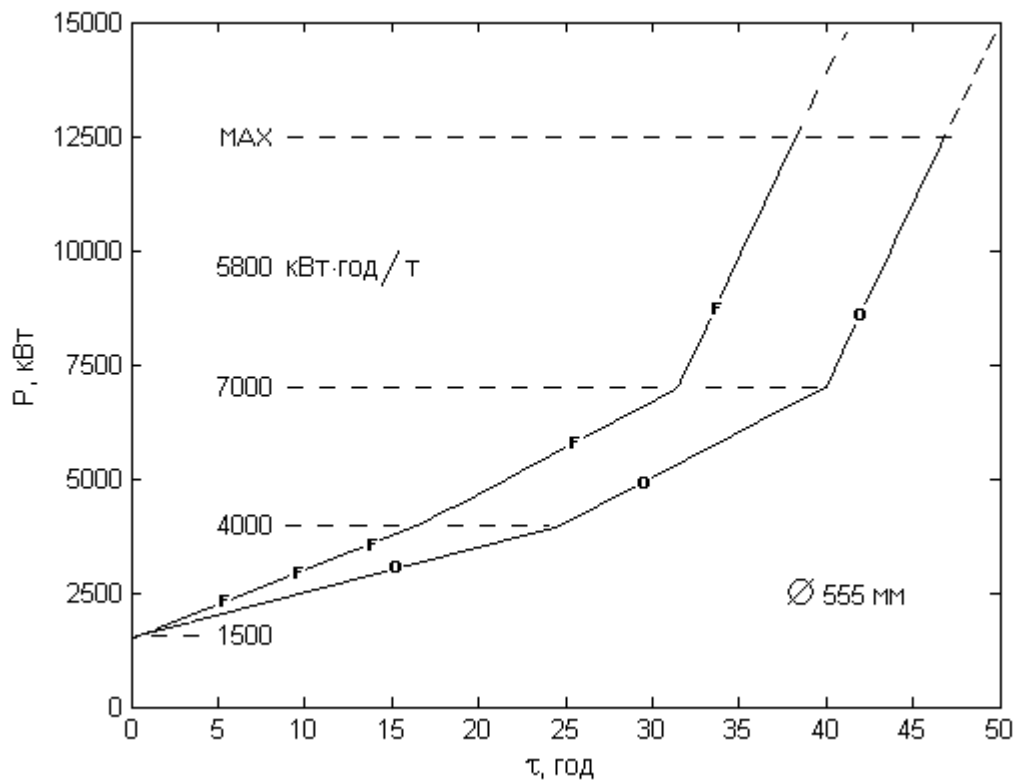


Рис. 2.4. Регламенти підведення потужності

Схему розташування контрольних точок експериментальної кампанії з ординарним регламентом зображено на рис. 2.5 .. 2.8.

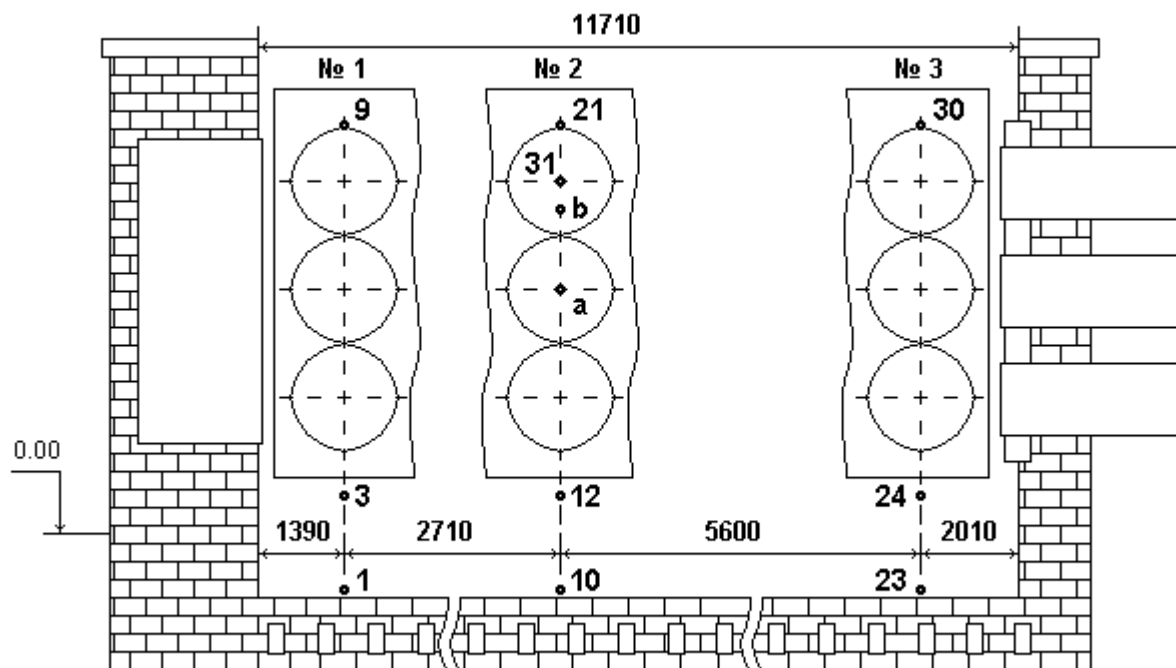


Рис. 2.5. Поздовжній переріз камери печі, ординарний регламент

За допомогою термопар досліджувалась зміна температури в електродних заготовках та на периферії керна, а також температура подової та верхньої теплоізоляції в трьох перерізах. Переріз № 1 відповідає вертикальному ряду заготовок біля графітової перемички, що з'єднує камери П-образної печі (точки 1 .. 9). Переріз № 2 відповідає вертикальному ряду заготовок в середній частині печі (точки 10 .. 12, 16 .. 18 та 21), та переріз № 3 розташовано біля струмопідвідних електродів (точки 22 .. 30).

Крім того, в середньому перерізі контролювалась температура бокової теплоізоляції. При цьому точка 31 розташована біля керна з боку зовнішньої стіни а точки 20 і 19 з боку “глухої” стіни (тобто стіни, що розділяє камери П-образної печі).

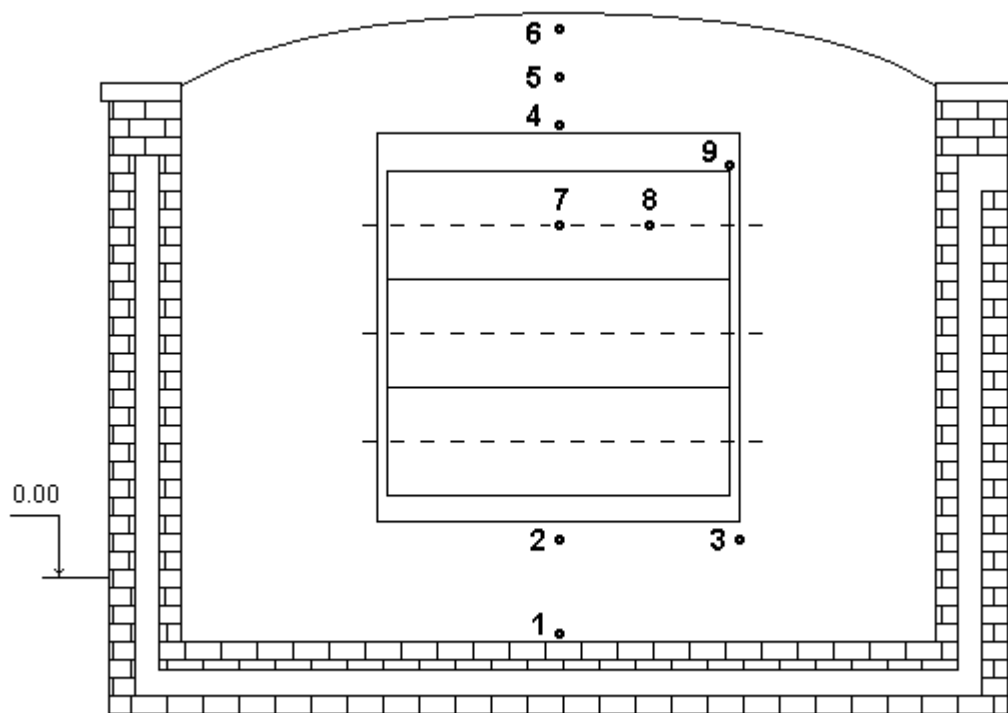


Рис. 2.6. Поперечний переріз № 1, ординарний регламент

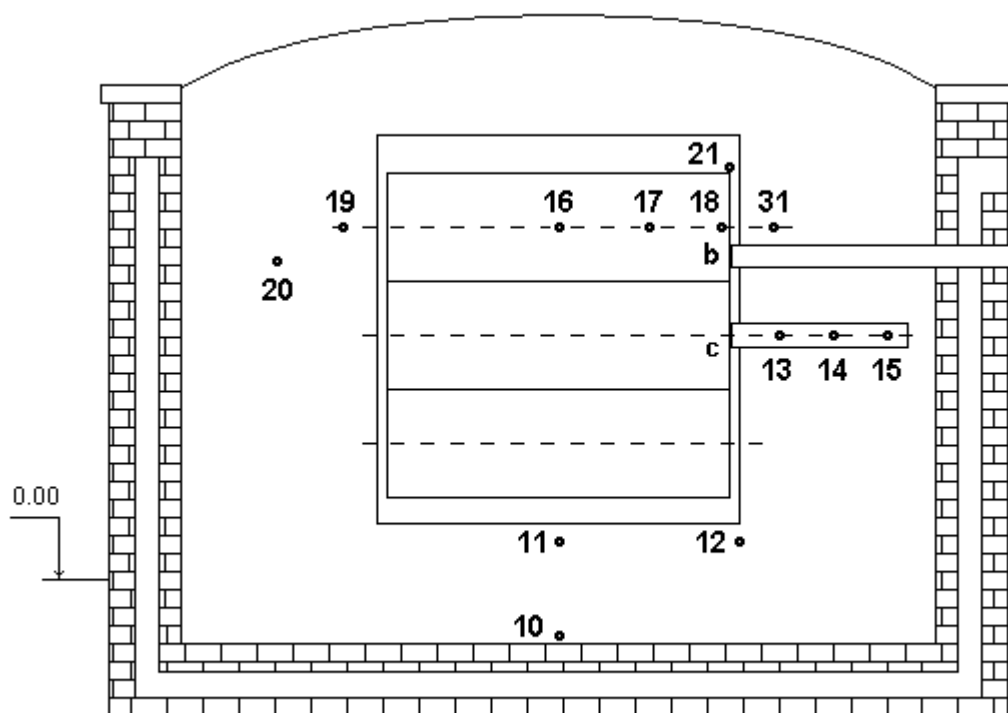


Рис. 2.7. Поперечний переріз № 2, ординарний регламент

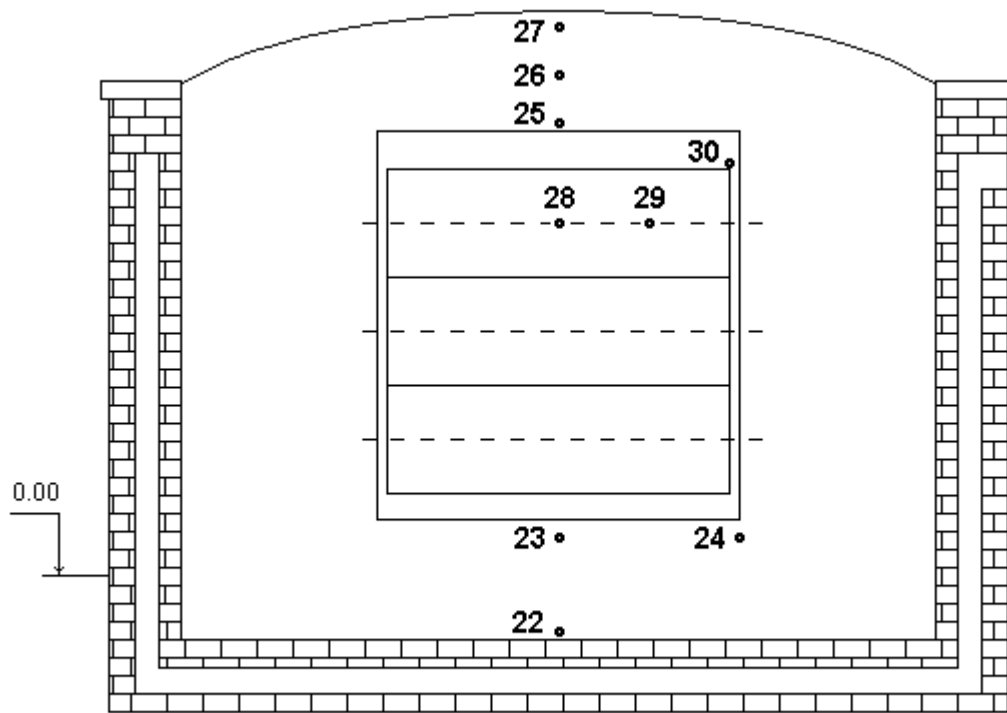


Рис. 2.8. Поперечний переріз № 3, ординарний регламент

Додатково в перерізі № 2 контролювалась температура периферії заготовки верхнього ряду (точка “b”) пірометричним способом, та температура периферії заготовки середнього ряду (точка “с”) за допомогою вимірювального тепловоду по трьом точкам (13 .. 15).

Температура периферії керна (точки 9, 21 та 30) визначалась за допомогою ВР-термопар. В інших контрольних точках застосовано ХА-термопари.

Реєстрація вимірювань термопарним способом велась в автоматичному режимі з частотою раз на 5 хвилин. Пірометричні вимірювання здійснювалися в ручному режимі з частотою раз на годину.

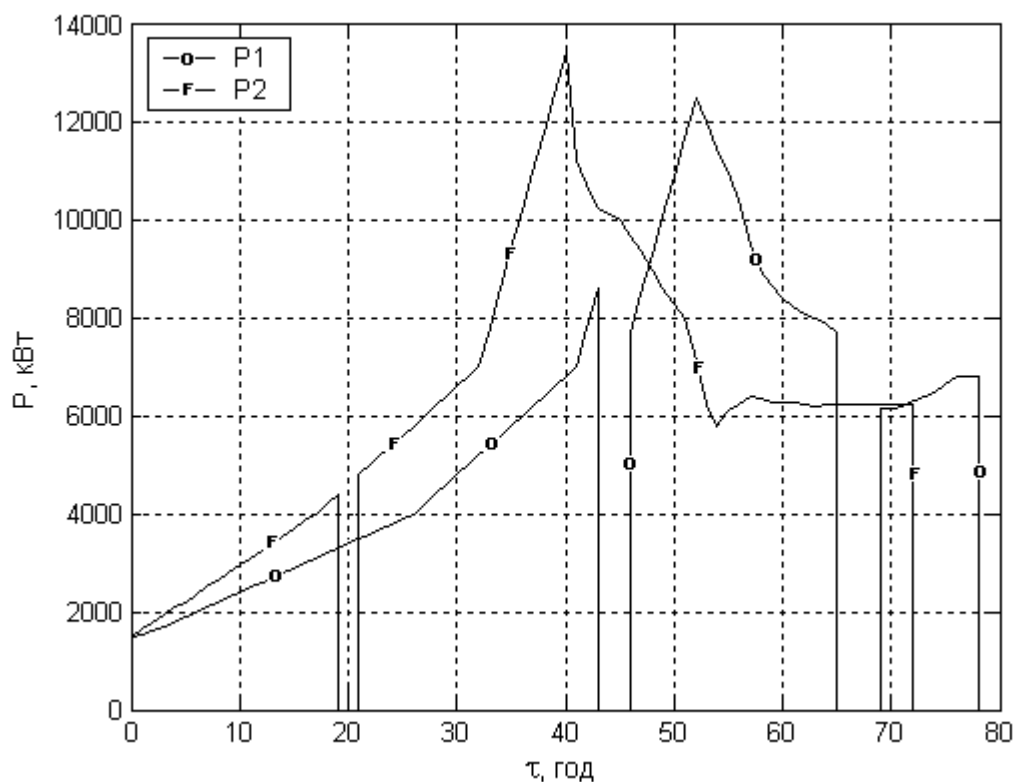


Рис. 2.9. Динаміка потужності печі графітації

Як видно з рис. 2.9, реальний графік підведення потужності P_1 в кампанії відрізняється від регламентного (див. рис. 2.4). Перерви в підведенні потужності пов'язані з технологічними відімкненнями системи електропостачання секції графітації. Сумарний простій печі в цій кампанії склав 7 год 40 хв, через що відповідно до ВТІ питома витрата електроенергії була збільшена до 6069.5 кВт·год/т.

Наведений графік потужності забезпечується керуванням напругою на трансформаторах джерела живлення пічної установки (див. рис. 1.7). Графік зміни керуючого впливу U_1 зображено на рис. 2.10. Пік потужності печі спостерігається на 52 год (0.66 в безрозмірному часі при тривалості кампанії: 1) що відповідає досягненню максимального значення сили струму I_1 пічної установки (рис. 2.11).

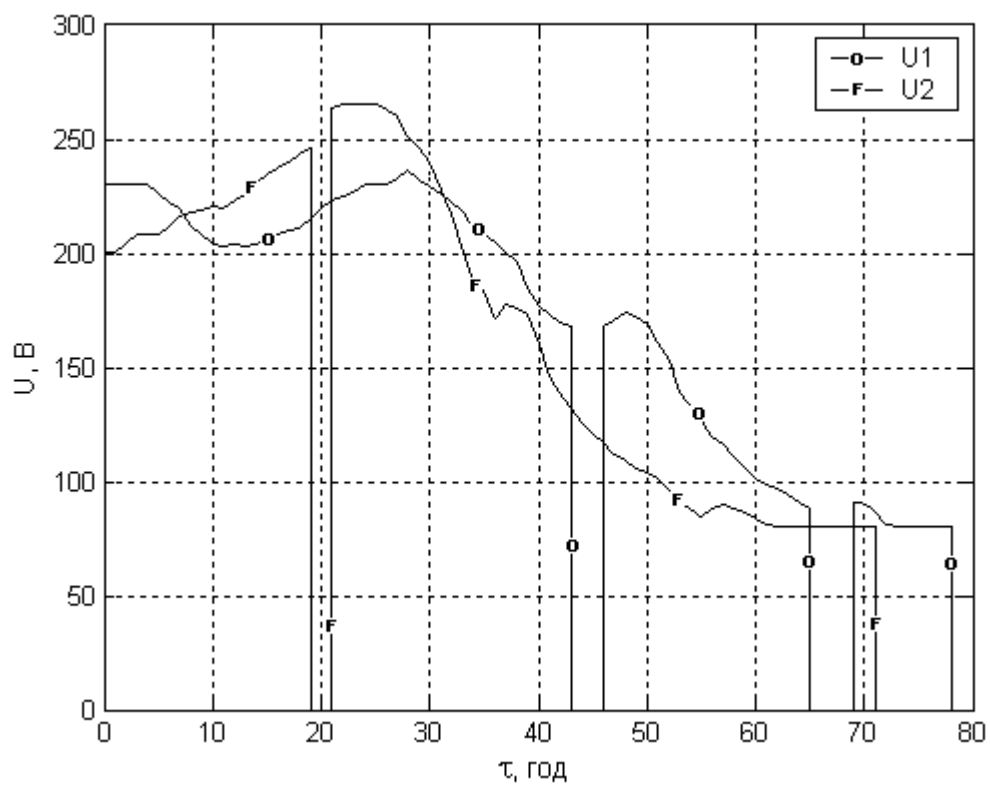


Рис. 2.10. Динаміка напруги печі графітації

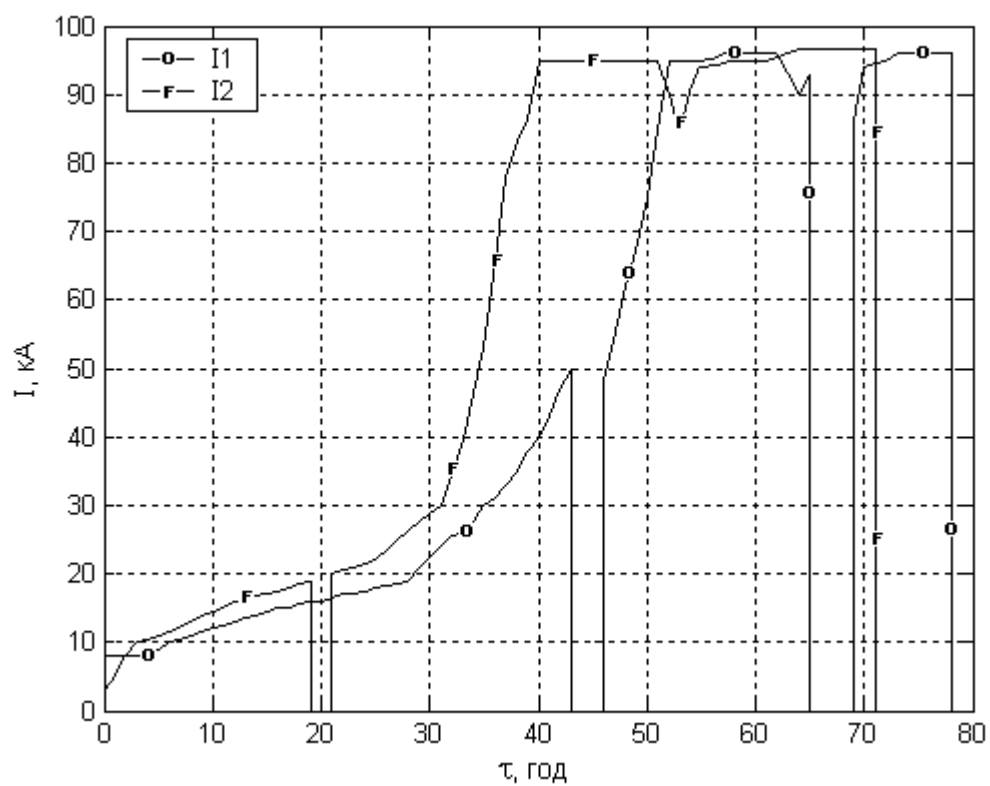


Рис. 2.11. Динаміка сили струму печі графітації

Характер зміни електричного опору печі R_1 в цій експериментальній кампанії видно з графіку, наведеного на рис. 2.12. Графік отримано розрахунковим шляхом.

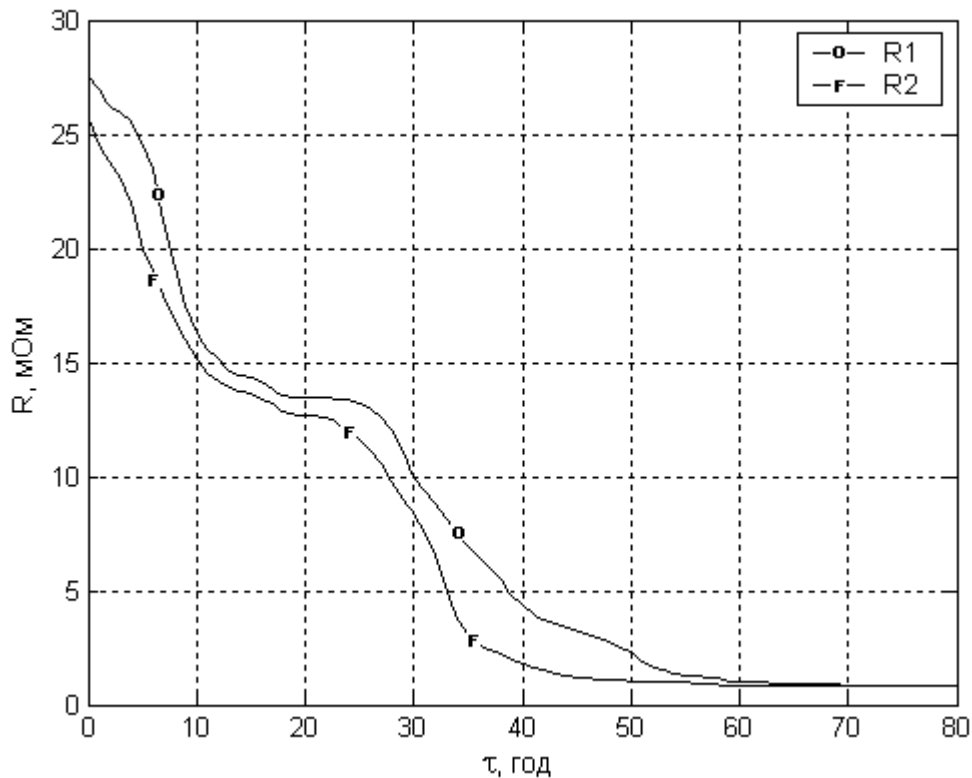


Рис. 2.12. Динаміка електричного опору печі графітації

Результати вимірювання температури в контрольних точках наведено в додатку А. Результати свідчать, що загальний характер розігріву керна печі: від центра до периферії. При цьому утворюється істотна нерівномірність розподілу температурного поля в просторі печі.

Експериментальні дані показують близьку швидкість розігріву та рівні досягнутих температур в перерізах № 2 та № 3 при істотно вищій швидкості розігріву в перерізі № 1. Такий характер розподілу температурного поля зберігається для всіх розглянутих областей внутрішнього простору печі: заготовок верхнього горизонтального ряду (рис. А.5 та А.6), периферії керна (рис. А.9), подової теплоізоляції (рис. А.13, А.14 та А.15) і верхньої теплоізоляції (рис. А.19).

Разом з тим температурне поле в області перерізу № 1 більш рівномірне, ніж в іншому об'ємі печі (максимальний градієнт температур в заготовках перерізу № 1 складає 576°C проти $752 \dots 787^{\circ}\text{C}$ в перерізах № 2 та № 3). Вказане явище пов'язане із значною акумуляцією теплоти торцевою стіною з графітовою перемичкою (рис. 2.5).

Експеримент свідчить про значний вміст вологи в матеріалах завантаження печі. На це вказує затримка розігріву в області позначки 100°C , яка спостерігається на всіх графіках. В заготовках затримка складає 2 .. 6 год і доходить до 47 год в подовій теплоізоляції.

При дослідженні динаміки температури верхньої теплоізоляції (рис. А.17 та А.18) після 43-ї год кампанії виявлено істотне уповільнення розігріву, що пов'язано з тригодинним припиненням підведення енергії. Разом з тим, в інших просторових областях печі зміна швидкості розігріву в цьому часовому інтервалі виражена несуттєво.

Порівняння температур подової, бокової та верхньої теплоізоляції у всіх перерізах (рис. А.16, А.12 та А.17 відповідно) свідчить про те, що подова теплоізоляція є “найхолоднішим” місцем в печі графітації під час кампанії.

По результатам експериментальної кампанії визнано доцільним більш детально дослідити температурне поле в середньому перерізі (№ 2), як в найбільш характерній області простору печі графітації.

2.4. Форсований регламент

Для з'ясування характеру розподілення температурного поля в середньому перерізі та визначення змін в енергоспоживанні піччю графітації були проведені температурні вимірювання під час кампанії графітації з форсованим регламентом підведення потужності (рис. 2.4, тут і надалі криві з індексом “Г”стосуються форсованого регламента).

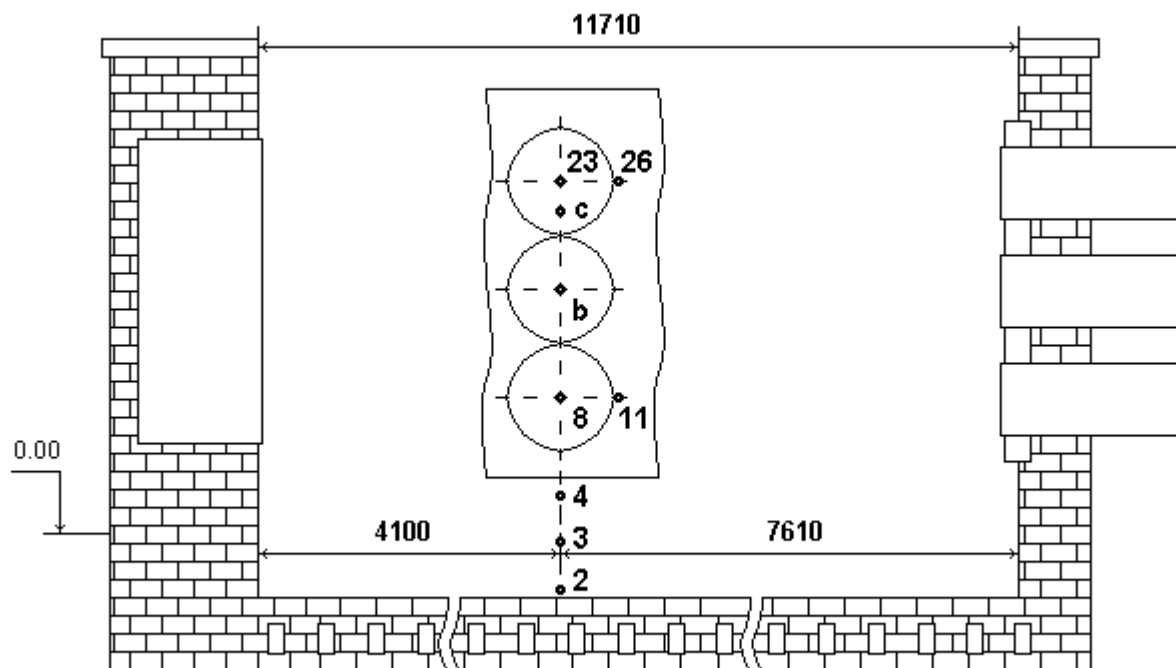


Рис. 2.13. Поздовжній переріз камери печі, форсований регламент

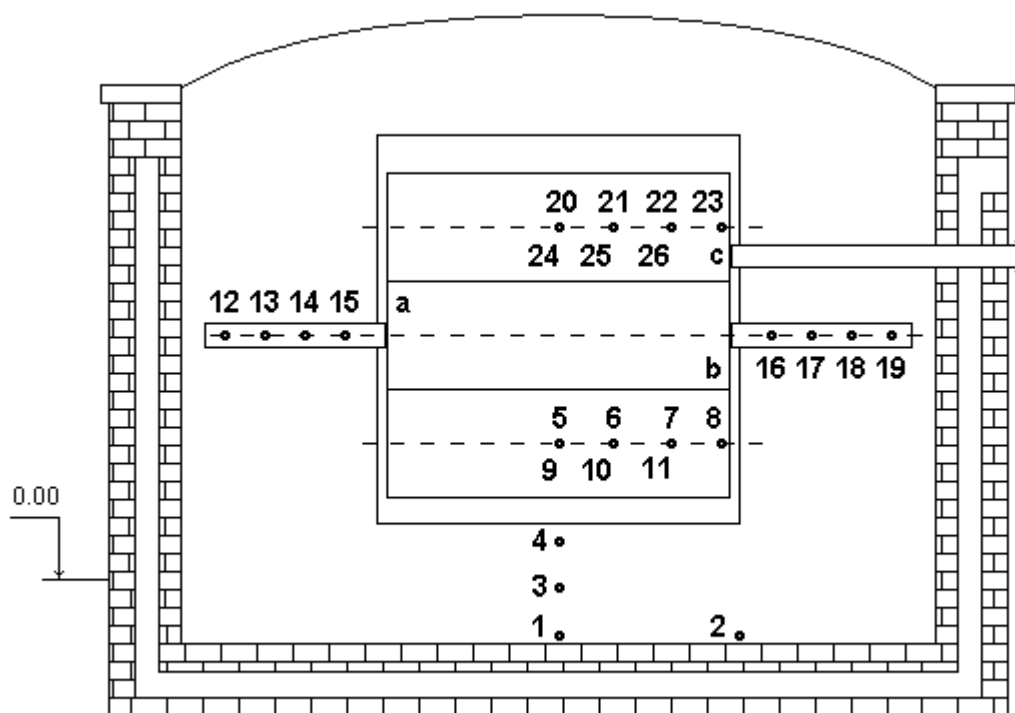


Рис. 2.14. Середній поперечний переріз, форсований регламент

Як видно з рис. 2.4, форсований регламент відрізняється від ординарного прискореним підведенням потужності на початковій ділянці (до 4000 кВт).

Електричні параметри кампанії P_2 , U_2 , I_2 та R_2 наведено на рис. 2.9 .. 2.12 відповідно. Сумарний простій печі в цій кампанії склав 1 год 25 хв і питома витрата електроенергії була збільшена до 5957.9 кВт·год/т. Пік потужності печі спостерігався на 40 год (0.56 в безрозмірному часі).

Схему розташування контрольних точок експериментальної кампанії зображено на рис. 2.13 та 2.14.

В цій кампанії за допомогою ВР-термопар контролювалась температура в електродних заготовках верхнього (точки 20 .. 23) та нижнього (точки 5 .. 8) ряду, а також температура кернової пересипки безпосередньо біля заготовок верхнього (точки 24 .. 26) та нижнього (точки 9 .. 11) ряду. Температура подової теплоізоляції визначалась за допомогою ХА-термопар (точки 1 .. 4).

Крім того, контролювалась температура периферії заготовки верхнього ряду (точка “с”) пірометричним способом, та температура периферії заготовки середнього ряду зі сторони “глухої” (точка “а”) та зовнішньої (точка “b”) стіни за допомогою вимірювальних тепловодів по чотирьом точкам (ХА-термопари в контрольних точках 12 .. 15 та 16 .. 19 відповідно).

Результати температурних вимірювань в контрольних точках наведено в додатку Б. Результати свідчать, що характер розігріву електродних заготовок: від поверхні контакту з керною пересипкою до осі заготовки (рис. Б.5, Б.6 та Б.7). При цьому радіальний градієнт температур в заготовках доходив до 434°C (в центрі заготовок нижнього горизонтального ряду на 28-ій год) при близький швидкості та досягнутих рівнях температури в заготовках верхнього та нижнього горизонтального ряду (рис. Б.8).

Як і очікувалось, температура периферії керна з боку другої (“сусідньої”) камери П-образної печі виявилась дещо вищою, ніж з боку зовнішньої стіни, що пов’язано з кращою теплоізоляцією “глухої” поздовжньої стіни (рис. Б.9, Б.10 та Б.11, а також 2.17). Але ця різниця не перевищує 190°C (та близька до заявленої точності вимірювання непрямым методом за допомогою тепловоду по чотирьом точкам) і не може істотно впливати на характер розподілу температури в перерізі,

що дозволяє в подальшому вважати температурне поле камери печі симетричним відносно центральної поздовжньої вертикальної площини.

2.5. Порівняльний аналіз експериментальних даних

Наявність технологічного обмеження по максимальній силі струму $I_{\max}$ трансформаторів джерела живлення пічної установки (рис. 2.11) розділяє кампанію графітації на дві стадії. На першій стадії існує можливість за допомогою керування U (рис. 2.10) змінювати темп розігріву виробів у широкому діапазоні, оскільки температура керна ще низька. Метою керування на стадії розігріву є підведення потужності до печі у відповідності з регламентом (рис. 2.4), що забезпечує обмеження швидкості розігріву до рівнів, які гарантують збереження цілісності виробів.

Із зростанням температури зменшується електричний опір печі (на початку кампанії він складає 25 .. 27 мОм і зменшується до 0.8 мОм наприкінці, рис. 2.12). Стадія розігріву закінчується, коли струм печі сягає максимального значення $I_{\max} = 96$ кА. Після цього потужність печі починає зменшуватись непередбачувано (рис. 2.9) і керування U дозволяє лише підтримувати струм печі на максимальному рівні. Метою керування на другій стадії кампанії є підтримка максимально можливої потужності печі в умовах невинного зменшення електричного опору. На другій стадії весь об'єм заготовок досягає температур графітації (більше 2000°C, п.р. 1.1) і вироби набувають бажаного ступеня графітації (β визначається опосередковано за питомими витратами енергії, рис. 2.4), після чого підведення потужності припиняється.

Загальна тривалість ординарної кампанії з урахуванням вимушених простоїв склала 78 год 20 хв. Тривалість кампанії з форсованим регламентом склала 70 год 45 хв. При цьому в кампанії з ординарним регламентом була досягнута максимальна потужність печі на рівні $P_{1\max} = 12500$ кВт. В кампанії з форсованим регламентом максимальна потужність була досягнута на 12 год швидше і склала $P_{2\max} = 13450$ кВт. Отримані результати свідчать, що

інтенсифікація процесу графітації зменшує непродуктивні втрати теплоти, оскільки відносно більша доля енергії акумулюється в просторі печі.

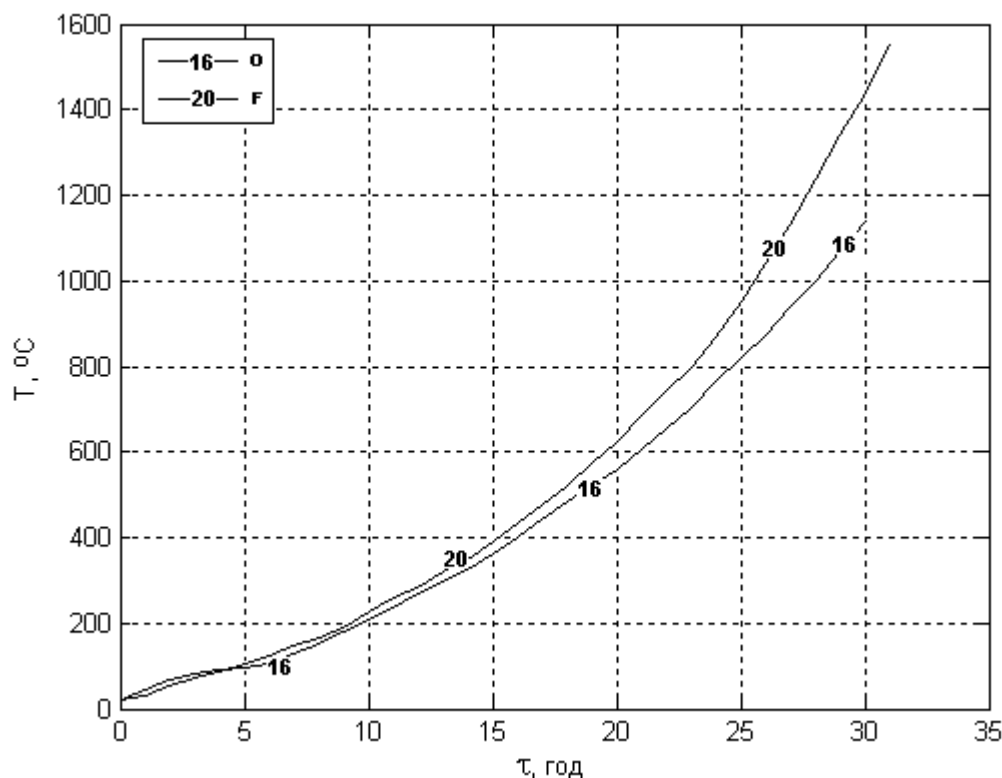


Рис. 2.15. Динаміка температури центру заготовок
верхнього горизонтального ряду

Як видно з рис. 2.15, на початковій стадії обох кампаній температура в центральній частині заготовок верхнього горизонтального ряду близька, але після 25-ї години (коли вже завершена форсована ділянка в другому експерименті і обидві кампанії керуються однаковим регламентом) швидкість розігріву в другій кампанії значно перевищує швидкість розігріву в першій (ординарній) кампанії: $102^\circ\text{C}/\text{год}$ проти $63^\circ\text{C}/\text{год}$.

Це (а також характер споживання енергії піччю) дає підстави вважати, що і кінцеві рівні температур заготовок в другій кампанії перевищили тіж показники першої кампанії.

Таке припущення підтверджують результати вимірювання температури периферії керна (рис. 2.16), які велись в обох кампаніях на другій стадії (майже до її завершення). Через руйнування візирної графітової труби пірометричні

вимірювання в першому експерименті було припинено за 4 год до завершення кампанії, а в другому експерименті за 11 год.

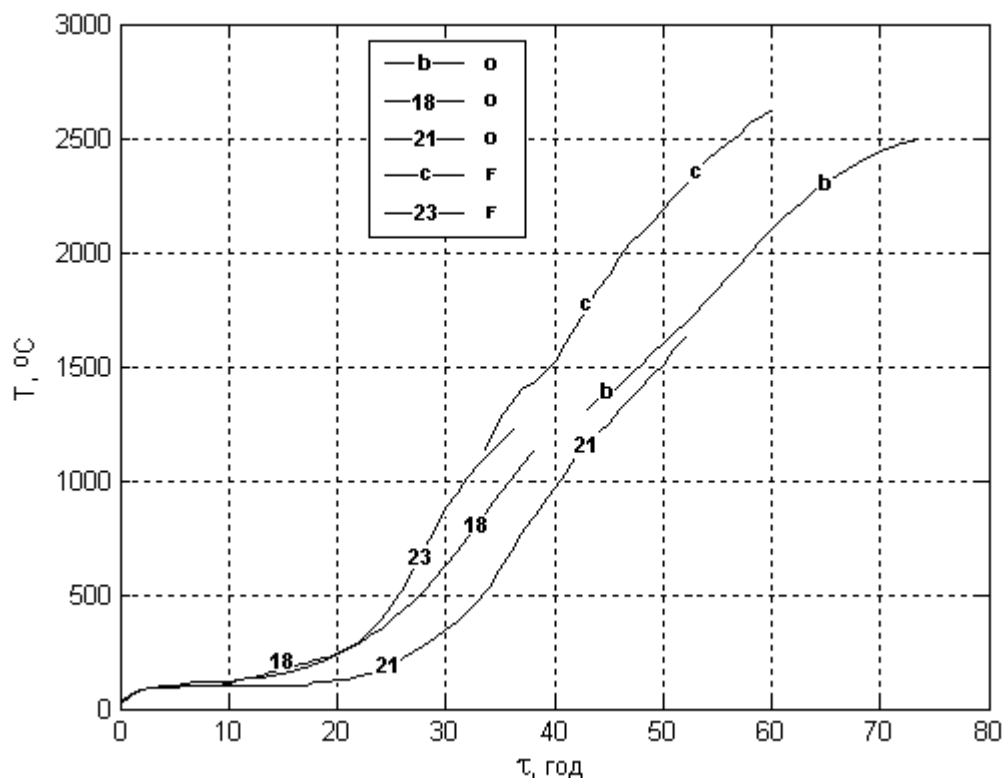


Рис. 2.16. Динаміка температури периферії заготовок
верхнього горизонтального ряду

Пірометричні вимірювання показують, що навіть в ординарній кампанії температура периферії керна доходить до 2500°C, а в кампанії з форсованим регламентом гарантовано перевищує 2500°C в “найхолоднішому” місці. При цьому температури графітації (2000°C) периферія заготовок верхнього ряду в другому експерименті досягає на 11 год раніше (0.07 в безрозмірному часі), ніж в першому.

Порівняльний аналіз зміни температури в заготовках верхнього та нижнього ряду на першій стадії кампанії з форсованим регламентом (рис. Б.5 .. Б.8) показує подібність теплових процесів. Максимальний осьовий градієнт в заготовках верхнього та нижнього ряду (на 30-й год кампанії) склав 607°C та 592°C

відповідно. При цьому максимальний осьовий градієнт в заготовках верхнього ряду на 30-ій год ординарної кампанії склав 509°C .

Середня швидкість розігріву периферії заготовок верхнього та нижнього горизонтального ряду після 25-ї год в другому експерименті склала $65^{\circ}\text{C}/\text{год}$ та $62^{\circ}\text{C}/\text{год}$ відповідно, а середня швидкість розігріву периферії заготовок верхнього ряду в першому експерименті – $51^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

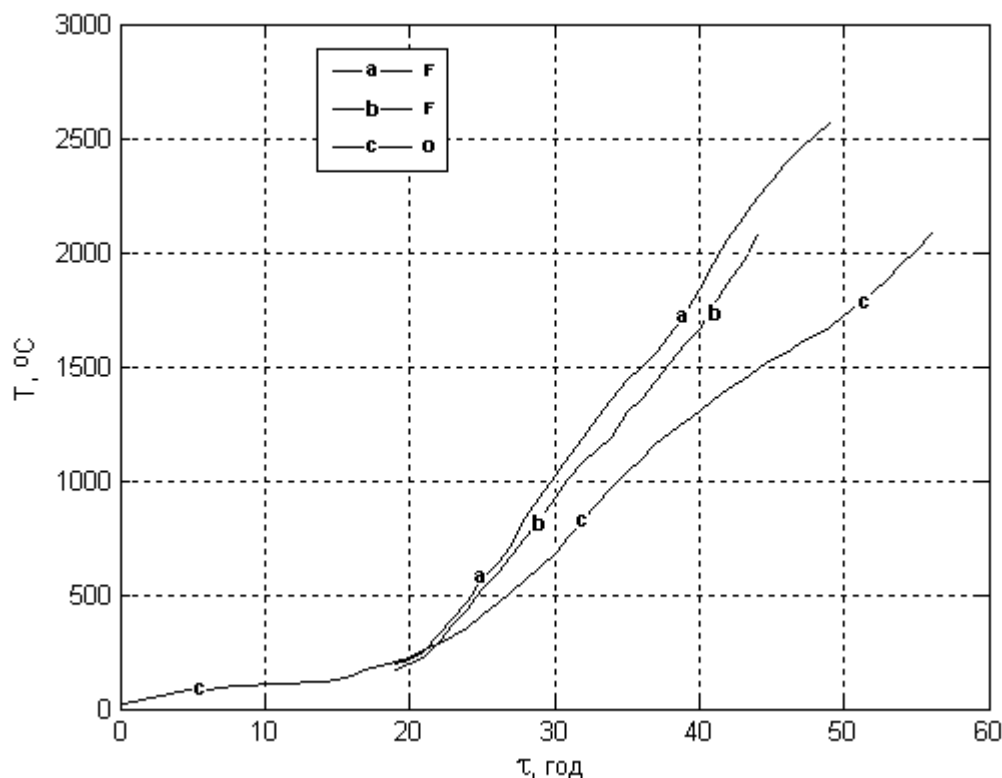


Рис. 2.17. Динаміка температури периферії заготовок середнього горизонтального ряду

Аналогічні результати дає дослідження температури периферії заготовок середнього ряду (рис. 2.17), який розігрівався значно швидше ніж верхній та нижній ряди (рис. 2.15 та Б.5). Після 25-ї години швидкість розігріву в першій кампанії складає $57^{\circ}\text{C}/\text{год}$ а в другій $72^{\circ}\text{C}/\text{год}$. При цьому температури графітації периферія заготовок середнього ряду в другому експерименті досягає на 12 год раніше (0.09 в безрозмірному часі), ніж в першому.

Динаміка температури подової теплоізоляції (рис. 2.18) повторює загальну закономірність. Крім того, слід відзначити, що повне випаровування вологи в області керна для першої кампанії відбулось на 59-й год (0.76 в безрозмірному часі при початку другої стадії з моменту 0.66), а для другої кампанії на 40-й год (0.56 в безрозмірному часі). Тобто на другій стадії кампанії з форсованим регламентом (в умовах зниження потужності) енергія не витрачається на випаровування вологи, що також сприяє досягненню більш високих кінцевих рівнів температур в заготовках (в порівнянні з ординарною кампанією).

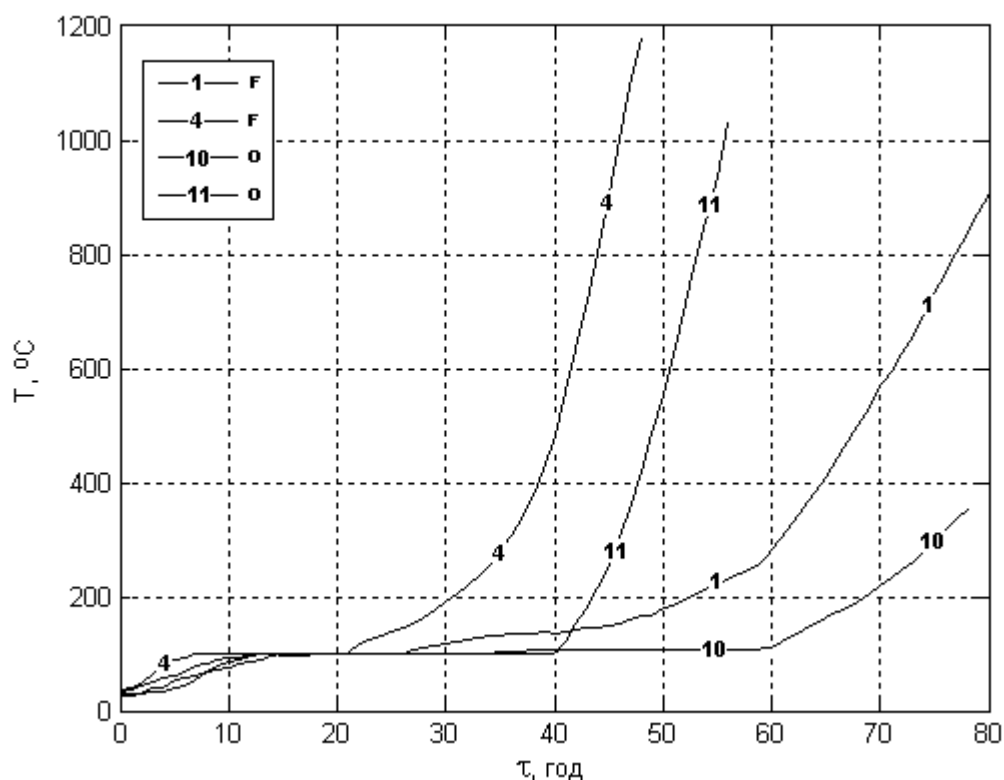


Рис. 2.18. Динаміка температури подової теплоізоляції

Той факт, що на початкових ділянках регламентів (які істотно відрізняються) темп розігріву та рівні температур керна та теплоізоляції близьки, а в подальшому (коли регламенти співпадають) темп та рівні температур в другому експерименті значно перевищують відповідні показники першого експерименту (з ординарним регламентом), свідчить про значну початкову інерційність об'єкту.

Характер реакції динаміки просторового температурного поля на тимчасові припинення підведення енергії (коли керування $U = 0$) вказує на суттєву нерівномірність розподілення параметрів в просторі печі та на зміну величин параметрів об'єкта впродовж кампанії.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Проведені експериментальні дослідження ординарної кампанії графітації та кампанії графітації з форсованим регламентом підведення потужності. Аналіз отриманих результатів дозволив з'ясувати особливості енергоспоживання піччю графітації та визначити характер просторового розподілення температурного поля у внутрішньому просторі.
2. Піч графітації належить до об'єктів із суттєвим просторовим розподіленням параметрів.
3. Піч графітації належить до об'єктів з періодичною дією. При цьому об'єкт працює в динамічному режимі впродовж всієї кампанії.
4. Кампанія графітації має дві стадії. На першій стадії (розігріву) об'єкт (піч графітації) повністю керований за каналом напруга $U \rightarrow$ потужність P . Друга стадія характеризується непередбачуваним характером зміни потужності і керування зводиться до підтримки об'єкта на рівні обмеження $I_{\max}$.
5. Просторовий розподіл температурного нестационарного поля об'єкта має істотну нерівномірність. При цьому для дослідження теплових процесів всієї печі можна обмежитись розглядом просторової області біля центрального поперечного перерізу. Температурне поле печі можна вважати симетричним відносно центральної поздовжньої вертикальної площини.
6. Об'єкт має значну інерційність за каналом напруга $U \rightarrow$ температурне поле T на початковій стадії кампанії. Динамічні властивості об'єкта (за вказаним каналом) змінюються впродовж кампанії.

7. Інтенсифікація процесу графітації призводить до зменшення непродуктивних втрат енергії та збільшення кінцевих рівнів температур у виробках, що сприяє підвищенню якості кінцевої продукції. Разом з тим вона збільшує нерівномірність просторового розподілу температурного поля, що потенційно може призвести до утворення дефектів у виробках.

3. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТАЦІЇ

3.1. Вибір критерію керування та вимоги до математичного опису процесу графітації

Виробництво графітованої продукції в печах Ачесона надзвичайно енергоємне. Питомі енерговитрати в таких печах можуть сягати 10000 кВт·год на т продукції (п.р. 1.4), а існуючі способи керування процесом графітації не дозволяють суттєво знизити непродуктивні витрати енергії (п.р. 1.7).

Метою створення системи керування процесом графітації в печі Ачесона є мінімізація енерговитрати при забезпеченні стабільної якості кінцевої продукції. У зв'язку з цим за критерій оптимальності процесу графітації доцільно обрати енерговитрати з обмеженнями на якість кінцевої продукції.

Вибір енерговитрат як критерію керування обумовлено передусім природою об'єкта (піч прямого нагрівання, п.р. 1.4) та способами керування цим об'єктом (усі вони зводяться до варіювання кількістю підведеної до печі енергії, п.р. 1.7). Крім того мінімізація енерговитрат забезпечує покращення всіх інших техніко-економічних показників процесу графітації (таких як: тривалість кампанії, коефіцієнт використання обладнання, собівартість виробництва тощо).

У кінцевому вигляді кількісну частину економічного критерію, відповідно до [98, с. 15] можна сформулювати у вигляді функціонала, що характеризує витрату енергії на керування. Оскільки керування піччю здійснюється від джерела енергії, яке має обмеження за потужністю, то при використанні електричного джерела живлення постійного струму скалярний критерій оптимальності можна сформулювати у вигляді

$$Y_1(\tau) = \int_0^{\tau_k} P(\tau) d\tau = \int_0^{\tau_k} U(\tau) I(\tau) d\tau; \quad (3.1)$$

де τ_k – тривалість кампанії графітації;

P – потужність печі;

U – напруга печі;

I – сила струму печі.

Отримана з умови мінімуму функціонала (3.1) система керування процесом буде оптимальною за витратою енергії на керування.

Як видно з табл. 3.1 (тут наведено орієнтовні статті витрат енергії, отримані за даними [3, с. 98–101]), тільки невелика частина підведеної до печі енергії витрачається власне на утворення кристалічної структури вуглецю у виробках.

Істотна частина енергії витрачається на нагрівання елементів конструкції та супутніх матеріалів завантаження печі (в тому числі і на випаровування вологи). За масою допоміжні матеріали (теплоізоляційна шихта, керна пересипка та інш., рис. 1.4), як правило, удвічі перевищують корисне завантаження печі.

Статті витрат енергії 1-ї групи (див. табл. 3.1) пов'язані із специфікою метода Ачесона і не можуть бути змінені під час кампанії, оскільки не залежать від керувань об'єкта (п.р. 1.4, 1.7 та 1.8). Віднесемо наведені статті до незмінною складовою функціонала (3.1).

Таблиця 3.1

Тепловий баланс печі графітації

Група	Стаття витрат	Доля, %
1	Керн печі	76
	Електродні вироби	22
	Сипкі матеріали завантаження печі	26
	Керна пересипка	12–16
	Утворення карбідів	5
	Футеровка	6–10
2	Електрична мережа	24
	Теплові втрати	22–28

Значна частина енергії розсіюється в оточуючому середовищі з поверхонь елементів конструкції печі та втрачається короткою мережею (статті витрат 2-ї групи, див. табл. 3.1). Як відзначено в [3], до 75 % цих втрат припадає на тепловіддачу в оточуюче середовище в останні години кампанії графітації. Саме

ці втрати у найбільшій мірі можуть слугувати джерелом економії електроенергії (мінімізації функціонала (3.1) шляхом відповідного керування).

Крім того, резервом енергозбереження є надмірні витрати енергії на нагрівання електродних заготовок (витрати, що перевищують теоретичний мінімально необхідний рівень, п.р. 1.1), які завжди існують при керуванні процесом графітації в традиційний спосіб (п. 1.7.1).

Якісна складова економічного критерію повністю характеризується тепловим станом ядра печі графітації (п.р. 1.2 та 1.5), який в свою чергу визначається кількістю підведеної енергії та швидкістю її підведення. При цьому треба розглядати два аспекти якості:

1. Динаміка просторового температурного поля $T(\tau)$ характеризує рівень термічних напружень $\sigma(\tau)$ в електродних заготовках, а, отже, визначає наявність (або відсутність) механічних дефектів у виробках.
2. Найнижчий досягнутий за кампанію рівень температур в об'ємі електродних заготовок $\min\{T(\tau_k)\}$ характеризує їх ступінь графітації $\beta(\tau_k)$, який є універсальним показником якості кінцевої продукції (п.р. 1.2).

Розглянемо детальніше піч графітації, як об'єкт керування (рис. 3.1).

Об'єкт має одне керування – електричну напругу U , зміна якої забезпечує поточний рівень споживання електричної енергії P . Сила струму печі I (та потужність P , як залежна величина) є природними спостережуваними змінними об'єкта.

На схемі традиційного способу керування (див. рис. 1.7) зображено також дискретний вхід об'єкта D (під'єднання витяжних магістралей системи охолодження), який деякі літературні джерела (наприклад, [82]) пропонують використовувати в якості додаткового керування (п. 1.7.2). Оскільки у великовантажних печах вказане керування на температуру ядра практично не впливає, в подальшому воно не буде розглядатись як вхідна змінна об'єкта.

Температурне поле T печі утворюється внаслідок накопичення в її об'ємі підведеної енергії (у вигляді джоулевої теплоти), тобто воно залежить від розподілу густини електричного струму J в об'ємі печі. Температурне поле є

основним показником стану об'єкта, але в промислових умовах температуру можна вимірювати тільки в обмеженій кількості точок T^* (див. також рис. 1.8), а безпосереднє визначення температури у виробах взагалі неможливе. Тому поле T , як і поле J , будемо в подальшому вважати неспостережуваними змінними стану об'єкта.

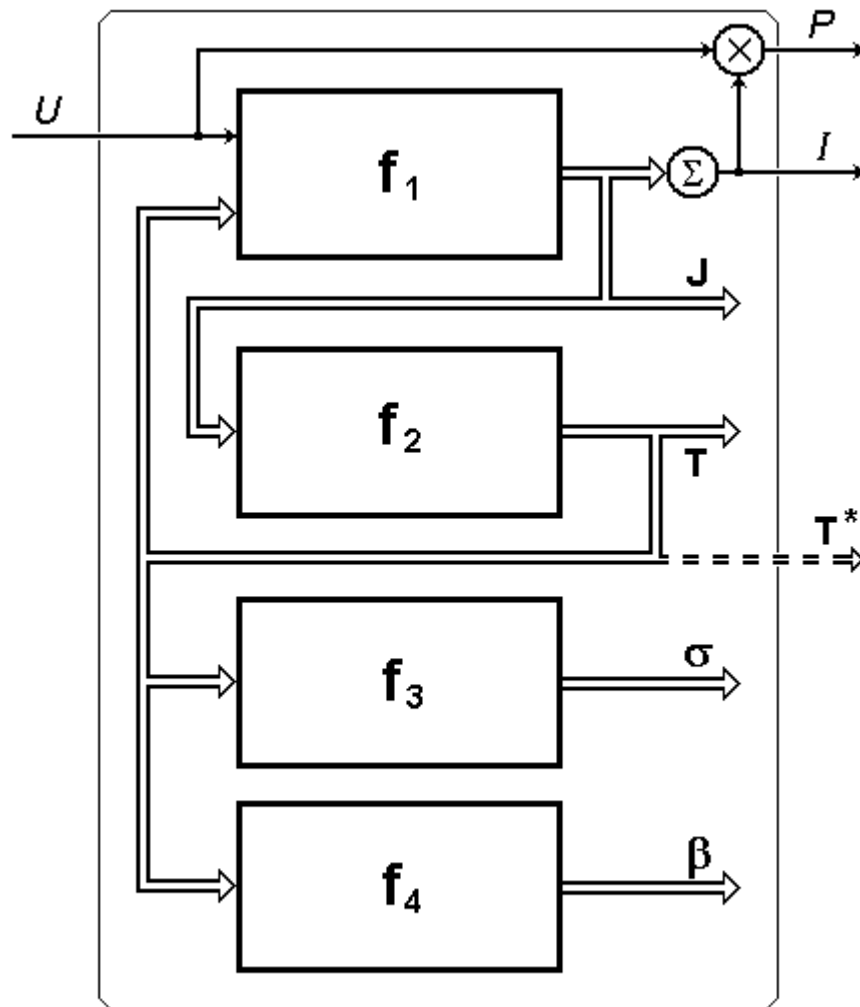


Рис. 3.1. Структурна схема об'єкта керування

Відповідно до розподілу поля T в печі формується розподіл поля термічних напружень у виробах σ , а при досягненні відповідного рівня температур у виробах формується розподіл ступеня графітації, що характеризується полем β .

Динаміка вказаних полів визначає якість кінцевої продукції, а самі моля також належить до неспостережуваних змінних стану об'єкта.

З урахуванням обмежень в загальній формі об'єкт керування (рис. 3.1) можна математично описати наступним чином:

$$P = f_1\{U, A_1(T), x, y, z, \tau\}; \quad (3.2)$$

$$T = f_2\{P, A_2(T), x, y, z, \tau\}; \quad (3.3)$$

$$\sigma = f_3\{T, A_3(T), x, y, z, \tau\}; \quad (3.4)$$

$$\beta = f_4\{T, x, y, z, \tau\}; \quad (3.5)$$

$$\tau_k = f_5\{\sigma, \beta, x, y, z, \tau\}; \quad (3.6)$$

при обмеженнях $0 \leq U(\tau) \leq U_{\max}; \quad (3.7)$

$$0 \leq I(\tau) \leq I_{\max}; \quad (3.8)$$

$$0 \leq \max\{\sigma(x, y, z, \tau)\} \leq \sigma_{\max}; \quad (3.9)$$

$$\beta_{\text{set}} \leq \min\{\beta(x, y, z, \tau)\} \leq 1. \quad (3.10)$$

де A – вектори параметрів моделі;

x, y, z – просторові координати моделі;

$U_{\max}$ – максимальна електрична напруга;

$I_{\max}$ – максимальна сила струму;

$\sigma_{\max}$ – максимально припустиме термічне напруження матеріалу виробів;

β_{set} – задане значення ступеня графітації виробів.

Технологічні обмеження (3.7) та (3.8) визначаються параметрами джерела живлення, а обмеження (3.9) та (3.10) пов'язані із якісною складовою економічного критерію і визначають тривалість кампанії графітації. При цьому для розв'язання задачі (3.6) необхідно мати оцінки змінних стану σ та β в реальному часі (3.4, 3.5), що, в свою чергу, передбачає наявність поточних оцінок змінних стану J та T (3.2, 3.3).

Аналіз експериментальних даних (п.р. 2.5) показує, що піч графітації є нестационарним динамічним об'єктом з розподіленими параметрами і його

електро-термічну модель (3.2), (3.3) слід створювати у класі нестационарних диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Із літературних джерел (наприклад, [73, 76, 79, 99, 100]) відомо, що електричні, термодинамічні та механічні властивості об'єкта мають істотну залежність від температури $A(T)$ і в діапазоні, що розглядається (до 3200°C), не можуть бути лінеаризовані. Отже, рівняння (3.2) .. (3.4) є нелінійними.

Крім того, температурний режим кожної поточної кампанії графітації, завдяки унікальній комбінації різних чинників, відрізняється від режимів попередніх кампаній, тобто непередбачувану зміну параметрів A можна розглядати як основне джерело неконтрольованих внутрішніх збурень в об'єкті.

На об'єкт також діють зовнішні випадкові збурення (такі, як зміна температури оточуючого середовища, зміна тиску у витяжних магістралях тощо), але вони впливають на розподілення температурного поля ядра неістотно (п. 1.7.2) і нехтуються при традиційному способі керування.

3.2. Декомпозиція задачі керування

Як свідчить проведене експериментальне дослідження (розд. 2), що також підтверджується і літературними джерелами [3, 13], найбільш ефективний засіб зменшення теплових втрат при графітації – це скорочення тривалості кампанії шляхом її інтенсифікації. При швидкому розігріві зменшуються непродуктивні втрати теплоти в оточуюче середовище і відповідно збільшується доля акумульованої теплоти, що йде на графітацію. Це положення опосередковано підтверджують результати експериментального дослідження об'єкта (п.р. 2.5).

Зменшення непродуктивних витрат акумульованої енергії (витрат, що перевищують теоретичний мінімально необхідний для утворення графіту рівень кількості енергії) також скорочує тривалість кампанії.

Виходячи із сказаного, можна стверджувати, що умову мінімуму функціонала (3.1) можна замінити умовою мінімуму функціонала (3.6) при дотриманні обмежень (3.9) та (3.10), які забезпечують якість кінцевої продукції.

Отримана з цієї умови система керування буде оптимальною за витратою енергії на керування та за швидкістю одночасно.

Отже, для мінімізації (3.1), режим графітації повинен бути найкоротшим, але визначення функціонала (3.6) ускладнено обмеженням (3.8), яке розділяє кампанію графітації на дві стадії (п.р. 2.5.).

На першій стадії швидкість розігріву обмежується термічною міцністю заготовок (3.4). Тому стадія буде найкоротшою, якщо виконується умова [144]

$$s(\tau) = \max\{\sigma(x, y, z, \tau)\} = \sigma_{\max}. \quad (3.11)$$

На другій стадії вироби вже набули пластичних властивостей і зникає загроза їх руйнування. Тепер розігрів можна було б пришвидшити для прискорення набуття всім об'ємом виробів бажаного ступеня графітації, але оскільки розігрів на другій стадії некерований, найменша тривалість стадії визначається тільки умовою [137, 138, 143]

$$\beta(\tau) = \min\{\beta(x, y, z, \tau_k)\} = \beta_{\text{set}}. \quad (3.12)$$

При цьому точне визначення моменту здійснення події (3.12) на другій стадії при максимально точному дотриманні умови (3.11) на першій стадії означає автоматичну мінімізацію критерію (3.6), а, отже, і критерію (3.1).

Для мінімізації енерговитрат [144], виходячи із сказаного, задачею системи керування на першій стадії кампанії є синтез такого керування U , що

$$U(\tau) = \arg \min_{U \in U} \{ \sigma_{\max} - s(\tau) \mid s(x, y, z) \leq \sigma_{\max} \}, \quad (3.13)$$

де U – область припустимих керувань, що визначається відповідно до (3.7).

На другій стадії задачею системи керування є підтримка струму печі на максимальному рівні

$$I(U, \tau) = I_{\max}; \quad (3.14)$$

до моменту виконання умови (3.12).

3.3. Стратегія керування

Керування на першій стадії кампанії (стадії розігріву), пов'язане з аналізом поточного термopужного стану виробів. Як зазначено вище, за каналом $U \rightarrow T$ (а, отже, і за каналом $U \rightarrow \sigma$) піч є нелінійним нестационарним динамічним об'єктом з розподіленими параметрами.

Наявність обмежень типу нерівність на керування та змінні стану робить область їх припустимих значень замкненою. Задачі синтезу оптимальних за швидкодією систем керування динамічними об'єктами з розподіленими параметрами при наявності таких обмежень в аналітичній формі зазвичай розв'язують за допомогою методів динамічного програмування [101], або методів фінітного керування [102]. Однак складна форма просторової моделі об'єкта (див. (3.3)) унеможливорює аналітичне розв'язання задачі (3.13).

Крім того, врахування обмежень (3.9) та (3.10) передбачає безпосереднє включення в алгоритм керування, що розробляється, моделі об'єкта для опосередкованого спостереження змінних стану в динаміці. Необхідність використання числових методів розв'язання рівнянь моделі (3.2) .. (3.4) не дозволяє знайти строге керування в сенсі задачі (3.13).

Якщо знехтувати збуреннями в системі (зовнішніми та внутрішніми, п.р. 3.1.), то об'єкт (3.2) .. (3.10) стає повністю детермінованим. Тоді для задач (3.13) та (3.12) можна шукати керування не як функцію спостережень, а тільки як функцію часу $U = U(\tau)$, використовуючи для прогнозування пошукові алгоритми на моделі об'єкта [103]. Такий підхід дозволяє знайти субоптимальне керування, що взагалі суттєво спрощує задачу синтезу (в порівнянні з аналітичними

методами), а при використанні складної нелінійної моделі об'єкта, що розглядається, є практично єдино можливим.

Власне, саме розімкнена стратегія у вигляді програмного керування з урахуванням (3.2) і реалізована в існуючих системах (п. 1.7.1.).

В реальних умовах кампанії графітації збурення вносять істотну невизначеність в модель, що змушує знаходити субоптимальну стратегію в замкненій формі $U = U(\tau, I)$, хоча для об'єкта з розподіленими параметрами спостережувані змінні об'єкта (в скалярній формі) не дозволяють однозначно визначити всі змінні стану.

В даній роботі для синтезу субоптимального керування застосовано метод покрокової корекції [103], в основі якого лежить періодично повторювана процедура розрахунку квазірозімкненої стратегії на кожному кроці навантаження печі графітації з подальшою корекцією оцінок параметрів моделі за результатами вимірювання вихідної змінної (зворотного зв'язку). Якщо впродовж обраного кроку збурення змінюються неістотно, метод дозволяє застосовувати детерміновану модель. Такий підхід забезпечує компенсацію похибки субоптимального керування, викликану випадковими збуреннями в об'єкті.

Алгоритм керування, заснований на методі покрокової корекції, неможливо реалізувати в реальному масштабі часу з декількох причин:

1. Необхідність розв'язувати варіаційну задачу в умовах неповної визначеності параметрів моделі.
2. Значна інерційність об'єкта за каналом $U \rightarrow T$ не дозволяє організувати корекцію параметрів на короткому кроці.
3. В силу специфіки умови (3.11) пошукові дії на об'єкті можуть призвести до руйнування виробів.

Тому систему керування слід будувати як двошкальну [104], де керування розраховується у вигляді прогнозу на кожному кроці при нових початкових умовах за допомогою швидкої моделі об'єкта із використанням оцінок параметрів. При цьому, оскільки модель працює в прискореному масштабі часу,

існує можливість реалізації адаптивної процедури оцінювання її параметрів за результатами поточного вимірювання спостережуваного виходу об'єкта.

Перша стадія закінчується, коли потужність печі сягає максимального (відповідно до умови (3.8)) значення і починає знижуватись.

Піч за каналом $U \rightarrow I$ є безінерційним нестационарним об'єктом, який слід розглядати в статиці і для розв'язання задачі (3.14) на другій стадії кампанії графітації пошукову процедуру з високою точністю можна організувати в реальному масштабі часу, використовуючи результати поточних вимірювань вхідних та вихідних змінних об'єкта [104].

Таке керування можна реалізувати звичайними засобами локальної автоматики, але для розв'язання задачі (3.12) система керування повинна продовжувати визначення температурного поля печі T у динаміці за допомогою швидкої моделі для поточного оцінювання та прогнозування ступеня графітації виробів β .

Друга стадія (та кампанія графітації в цілому) закінчується, коли спливає час τ_k , визначений при розв'язанні (3.12) в прискореному масштабі часу.

3.4. Структура системи керування

Для реалізації обраної стратегії систему керування доцільно будувати як дворівневу [105, 140, 150] (структурна схема такої системи показана на рис. 3.2, тут пунктиром вказано лінії дискретних керуючих сигналів). Верхній (стратегічний) рівень системи повинен забезпечувати оптимізацію кожної стадії процесу (в тому числі і в нештатних ситуаціях). Нижній (тактичний) рівень повинен забезпечувати реалізацію субоптимальних режимів, визначених на верхньому рівні [98], та здійснювати керування процесом за регламентом в автономному режимі (без верхнього рівня).

Для цього стадії діляться на часові інтервали корекції тривалістю ψ (впродовж інтервалу керування вважається сталим), для яких відповідно до (3.3) розраховуються оцінки змінних стану T .

На першій (керованій) стадії кампанії за оцінками T система верхнього рівня відповідно до (3.4) розраховує оцінки змінних стану σ і визначає субоптимальне керування (3.13) для кожного i -го інтервалау $[\tau_i, \tau_i + \psi]$, яке реалізує на об'єкті система нижнього рівня.

В загальному випадку керування може безпосередньо передаватись на вхід виконавчого пристрою (автоматичний режим), або у вигляді документа надходити оператору-технологу процесу (в автоматизованих людино-машинних системах, до яких належить існуюча система) [103].

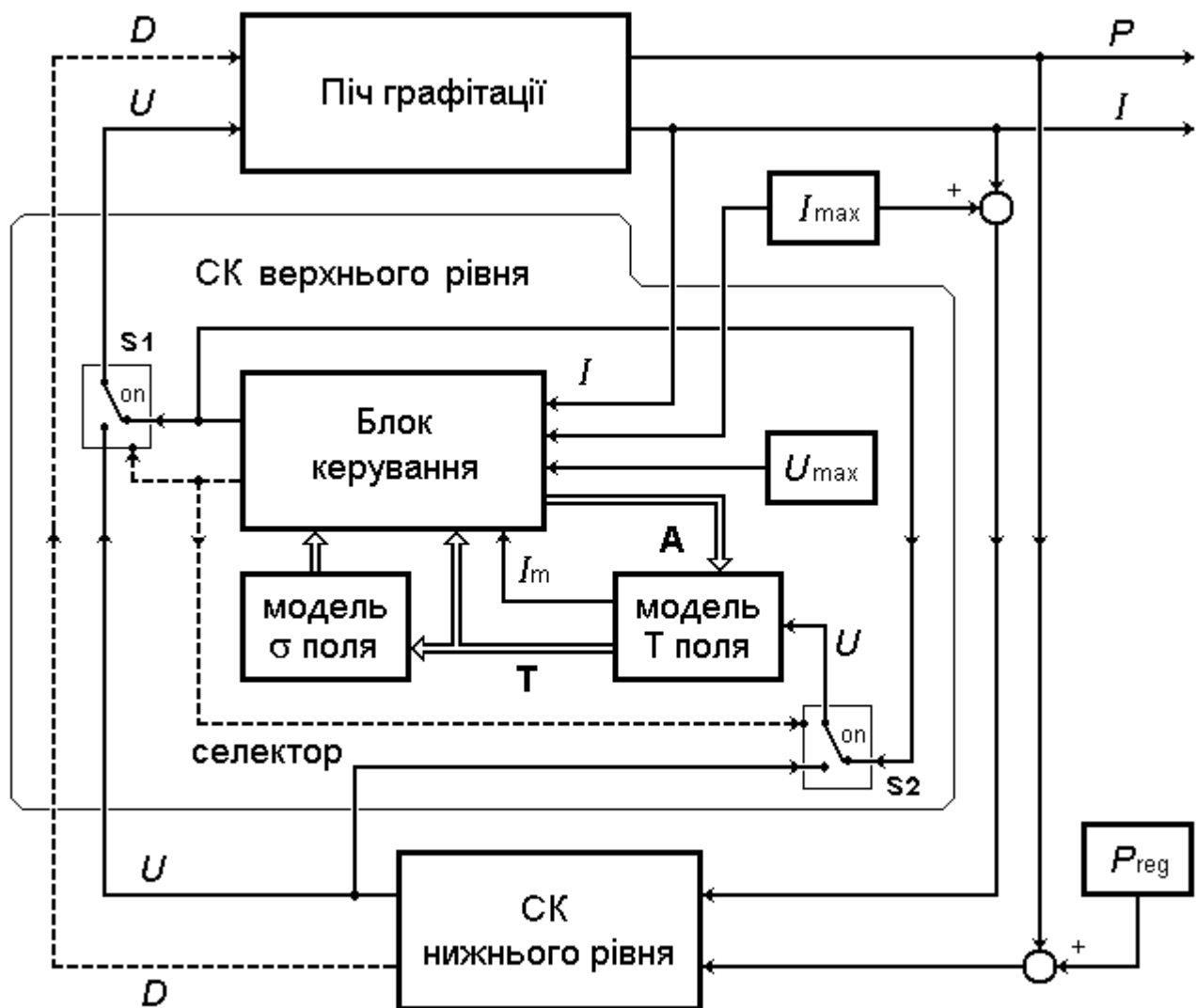


Рис. 3.2. Дворівнева структурна схема системи керування

Коли система верхнього рівня визначає початок другої стадії ($I = I_{\max}$), за допомогою селекторів s_1 та s_2 керування повністю передається системі нижнього рівня, яка розв'язує задачу (3.14) традиційними засобами (п. 1.7.1).

Впродовж другої стадії система верхнього рівня за оцінками T відповідно до (3.5) оцінює ступінь графітації виробів β та прогнозує тривалість кампанії τ_k шляхом розв'язання задачі (3.12) в прискореному масштабі. Коли поточний час сягає значення прогнозованої тривалості $\tau_i = \tau_k$, система верхнього рівня припиняє підведення енергії (селектор s_1).

Для забезпечення відповідності моделі реальному процесу процедуру покрокової корекції слід здійснювати шляхом адаптації параметрів, розв'язуючи задачу мінімізації деякої міри похибки між вихідними змінними моделі і об'єкта. Оскільки єдиним спостережуваним виходом об'єкта в промислових умовах є сила струму I , система верхнього рівня на першій стадії кампанії (або до завершення ідентифікації) повинна для кожного кроку визначати оцінку вихідної змінної I_m (модельного струму) на основі розв'язання задачі (3.2), (3.3) в прискореному масштабі часу (рис. 3.2).

У випадку, коли система керування верхнього рівня не може функціонувати в штатному режимі, кампанія графітації може бути завершена в неоптимальному режимі. Для цього система керування нижнього рівня повинна працювати в автономному режимі, реалізуючи звичайне програмне керування за допомогою бази регламентів P_{reg} . При цьому час припинення кампанії графітації визначається також на нижньому рівні за питомими витратами електроенергії (п. 1.7.1).

3.5. Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано вибір загальног критерію керування економічної природи, в якості якого запропоновано використовувати енерговитрати на кампанію графітації.

2. Доведено, що мінімізація швидкодії для процесу графітації тотожна мінімізації енерговитрат на графітацію, і саме цей показник треба використовувати як критерій керування.
3. В результаті проведеного аналізу здійснено декомпозицію задачі керування та сформульовано часткові задачі керування. Розроблено стратегії керування стадіями кампанії графітації у відповідності з частковими задачами. Обрано методи реалізації стратегій.
4. Визначено структуру основних моделей станів, що потрібні для опису об'єкта керування на всіх стадіях кампанії графітації. Обґрунтована необхідність застосування двошкальної системи керування, що використовує швидкі моделі основних процесів об'єкта.
5. Розроблено структуру дворівневої системи керування процесом графітації. Сформульовані умови, при яких система нижнього рівня має працювати в автономному режимі.

4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНІВ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ В ПЕЧІ АЧЕСОНА

4.1. Математична модель електричного поля печі графітації

Розглянемо задачу електропровідності (3.2) як розподілену для з'ясування характеру просторового поля густини струму, що визначає температурний стан печі графітації [139, 157].

4.1.1. Модель електричного поля ядра печі графітації.

Для побудови моделі електричного поля печі графітації постійного струму будемо вважати ядро складеним тілом, кожний елемент якого представлено однорідним ізотропним середовищем з ПЕО, що є функцією температури T , °С. Як зазначалось вище, об'єкт за каналом $U \rightarrow I$ можна вважати статичним, оскільки керування (напруга постійного струму, що протікає через ядро) змінюються порівняно повільно (на практиці швидкість розігріву не перевищує 2 .. 3 °С /хв). На цій підставі припускаємо, що в провідному середовищі не виникає явищ електромагнітної індукції і електричне поле може бути розглянуте окремо від магнітного [106].

Напруженість електричного поля в провідному середовищі визначається законом Ома в диференціальній формі:

$$\mathbf{J} = \mu(T) \cdot \mathbf{E}; \quad (4.1)$$

де $\mathbf{J}$ – вектор густини струму, А/м²;

$\mathbf{E}$ – вектор напруженості електричного поля, В/м;

μ – питома електропровідність матеріалу провідної області складного тіла ядра, 1/(Ом · м), що у загальному випадку є функцією температури T і визначається як:

$$\mu(T) = \frac{1}{\rho(T)},$$

де ρ – ПЕО матеріалу просторової області керна, Ом ·м.

Всередині кожної просторової області керна виконується умова:

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad (4.2)$$

тобто поле керна є безвихровим і може бути описане за допомогою електричного потенціалу φ як функції координат (потенціальної функції) [106, с. 12, 79]:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi(x, y, z), \quad (4.3)$$

де φ – електричний потенціал, В;

$x, y, z \in \Omega$ – координати, визначені на геометричній області, м.

Для з'ясування характеру електричних процесів в керні, виділимо розрахунковий фрагмент (РФ) печі, що включає два суміжні вертикальні ряди заготовок **ез** центральної частини печі, а також оточуючу їх кернову пересипку **пс** та шунтівні шари **пг** (рис. 4.1).

Внутрішні границі РФ утворені центральною поздовжньою вертикальною площиною xu (у відповідності з припущенням про симетричність температурного поля, п.р. 2.5) та поперечними вертикальними січними площинами yz , що проведено в області міжрядової кернової пересипки на однаковій відстані від суміжних вертикальних рядів заготовок (лінійний розмір РФ по осі x позначимо h). Зовнішні границі РФ співпадають з границями керна, оскільки теплоізоляційну шихту можна вважати непровідною (в електричному сенсі) областю (п.р. 1.4 та [1, с. 26]).

Для статичного електричного поля справедливо:

$$\text{div } \mathbf{J} = 0; \quad (4.4)$$

тобто силові лінії струму безперервні навіть на границі між елементами з різною провідністю.

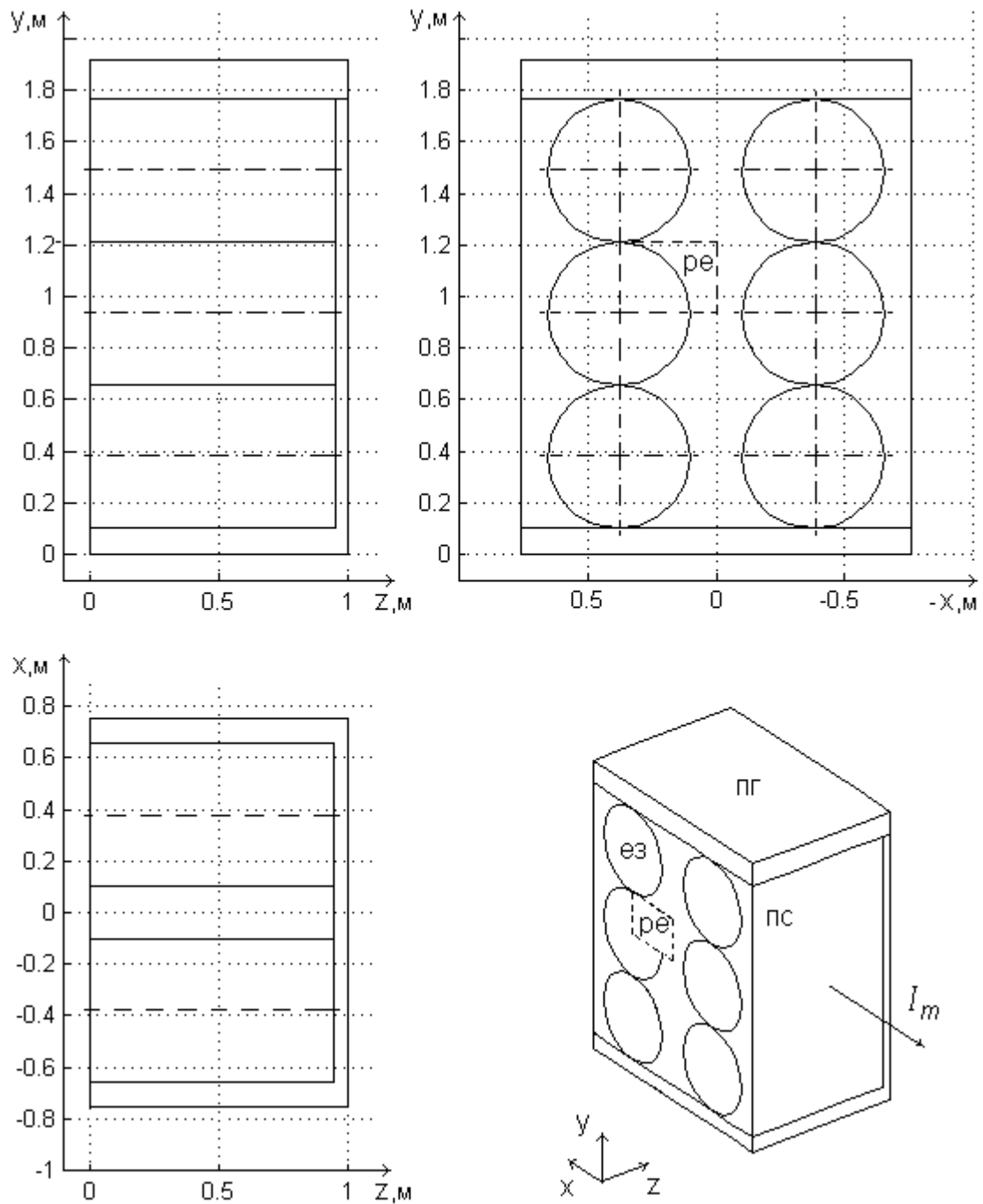


Рис. 4.1. Розрахунковий фрагмент задачі електропровідності

Граничні умови на зазначених границях характеризуються виразами:

$$\mathbf{J}_i^n = \mathbf{J}_{i+1}^n; \mathbf{E}_i^t = \mathbf{E}_{i+1}^t; \varphi_i = \varphi_{i+1}, \quad (4.5)$$

де i – індекс області, що визначена на просторових координатах x, y, z і описує провідний елемент керна;

$\mathbf{J}^n$ – нормальна складова вектора густини струму $\mathbf{J}$;

$\mathbf{E}^t$ – тангенціальна складова вектора напруженості $\mathbf{E}$.

Поверхня провідного елемента та електричного ізолятора описується виразом (умова ізоляції та умова симетрії):

$$\mathbf{J}^n = 0. \quad (4.6)$$

Закон зміни потенціалу на інших границях Γ елементів керна:

$$\varphi = \varphi(\Gamma). \quad (4.7)$$

Зокрема, $\varphi = 0$ – відповідає умові заземлення.

Крайові умови, що формують керуючий вплив на РФ:

$$\varphi|_{x=0} = 0; \varphi|_{x=h} = U_m(\tau), \quad (4.8)$$

де U_m – напруга на РФ, В.

Поле густини струму в провідному середовищі неоднорідно і струм, що проходить крізь РФ визначається як:

$$I_m = \int_F \mathbf{J} dF, \quad (4.9)$$

де I_m – розрахункова сила струму, А;

F – площа поверхні перерізу РФ в площині yz , м^2 .

Розв’язок задачі (4.1) .. (4.4) для кожної просторової області керна із граничними умовами (4.5) .. (4.8) для інтервалів часу, на яких електричні

параметри печі графітації можна вважати постійними, дає розподіл густини струму в об'ємі керна, що дозволяє визначати об'ємну густину внутрішнього джерела джоулевої теплоти для кожної просторової області при розв'язанні задачі визначення температурного поля печі графітації:

$$Q_i = \frac{J^2}{\mu_i(T)}, \quad (4.10)$$

де Q – об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³.

4.1.2. Числове моделювання електричного поля керна.

Для оціночного моделювання електричних процесів керна скористаємось даними, отриманими під час експериментальної кампанії графітації з ординарним регламентом підведення потужності (п.р. 2.3).

Обраний РФ (п. 4.1.1) описує 1/14 симетричної половини об'єма керна і представляє всі основні електричні процеси печі.

Перепад електричного потенціалу U_m між поперечними до осі границями та сила струму РФ I_m визначаються як:

$$U_m = K \cdot U_1 / 14; \quad I_m = I_1 / 2,$$

де U_1 – робоча напруга печі в експериментальній кампанії, В;

K – електричний коефіцієнт корисної дії печі (за даними [3, с. 104] він становить 70 .. 80 % на початку кампанії для печей змінного струму);

I_1 – робочий струм печі в експериментальній кампанії, А.

В табл. 4.1 представлені електричні параметри печі, що відповідають початку і закінченню експериментальної кампанії графітації при $K = 77.6 \%$. ПЕО матеріалів просторових областей керна ρ_k визначено за даними, наведеними в [80] для початкової температури і усередненої кінцевої температури керна, досягнутої в експериментальній кампанії (тут $k = \overline{1, 3}$ – індекси просторових областей керна).

Таблиця 4.1

Електричні показники ординарної кампанії

Період кампанії	I_1	I_m	$\hat{I}_m$	U_1	ΔU	T	$\rho_{\text{ез}}(T)$	$\rho_{\text{пс}}(T)$	$\rho_{\text{пг}}(T)$
	А			В		°С	мкОм·м		
початок	9000	4500	4382	220	12.2	20	48	8700	6000
закінчення	96000	48000	49637	80	4.4	2700	16	320	

Чисельний розрахунок моделі (4.1) .. (4.8) електричного поля керна методом скінчених елементів [107, 108] підтвердив припущення про значну однорідність електричних параметрів вздовж координатної осі z [1], що дозволяє розглядати результати моделювання тільки в площині xu .

Адекватність моделі підтверджується розрахунком оцінки струму розглянутої області згідно (4.9), що збігається з I_m для відповідного періоду кампанії із точністю, яка не перевищує 4 %.

На рис. 4.2 та 4.4 наведено еквіпотенціальні лінії в площині xu області, що моделюється, на початку і наприкінці експериментальної кампанії графітації відповідно. Характер еквіпотенціальних ліній, що проходять через центри електродних заготовок (переріз №1), а також у міжрядовій пересипці на однаковій відстані від сусідніх вертикальних рядів заготовок (переріз №2) дозволяє надалі зменшити РФ і обмежитися розглядом 1/4 розглянутої області при збереженні адекватності представлення всіх основних електричних (і теплових) процесів печі.

На рис. 4.3а та 4.5а наведено силові лінії в площині xu модельованої області на початку і наприкінці експериментальної кампанії графітації відповідно, які визначають розподіл густини струму в об'ємі керна, а, отже, і розподіл об'ємної густини внутрішнього джерела джоулевої теплоти.

Якісний аналіз розподілу густини струму в міжрядовій пересипці підтверджує загальні уявлення про характер електричних процесів в керні і повністю збігається з результатами натурних експериментів (п.р. 2.5).

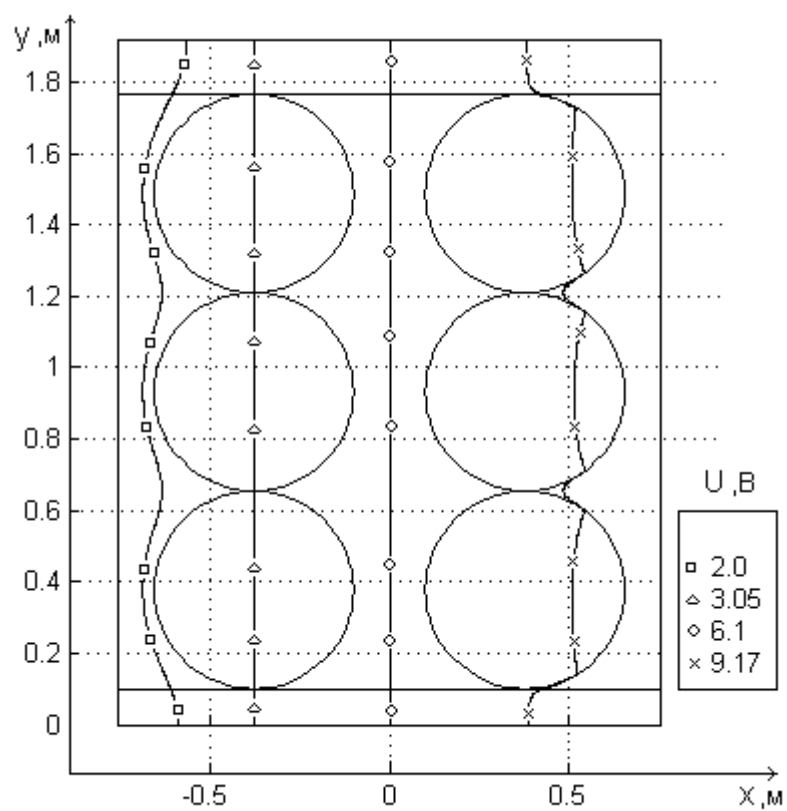


Рис. 4.2. Еквіпотенціальні лінії на початку ординарної кампанії

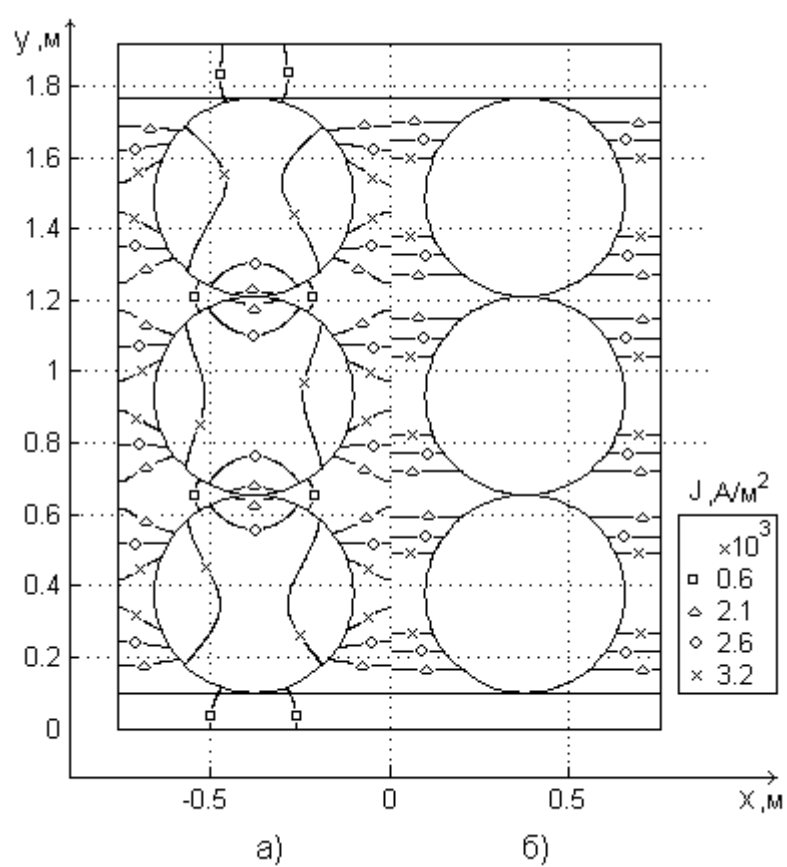


Рис. 4.3. Силі лінії на початку ординарної кампанії

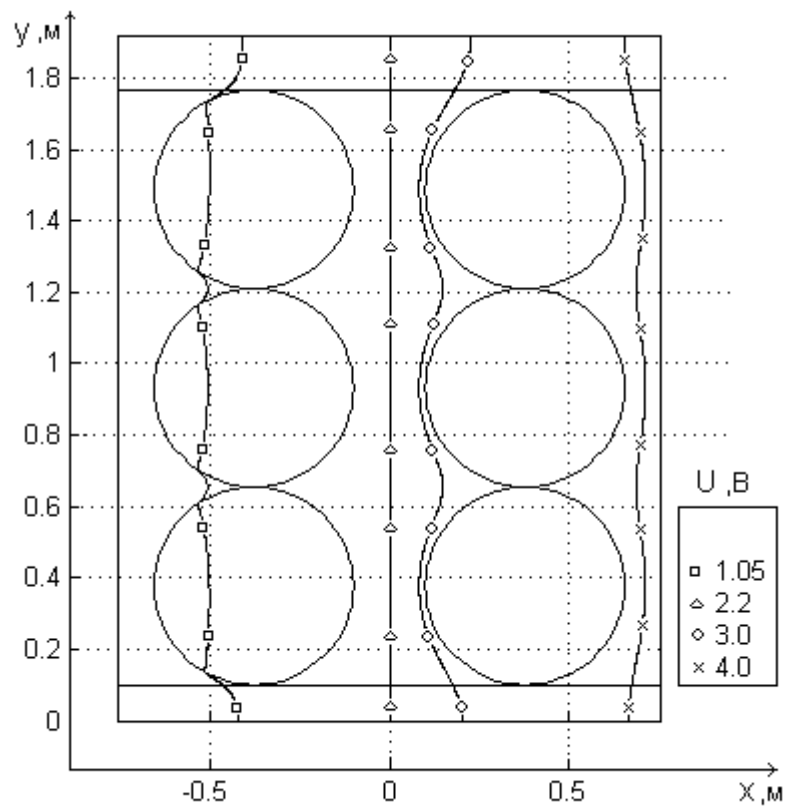


Рис. 4.4. Еквіпотенціальні лінії наприкінці ординарної кампанії

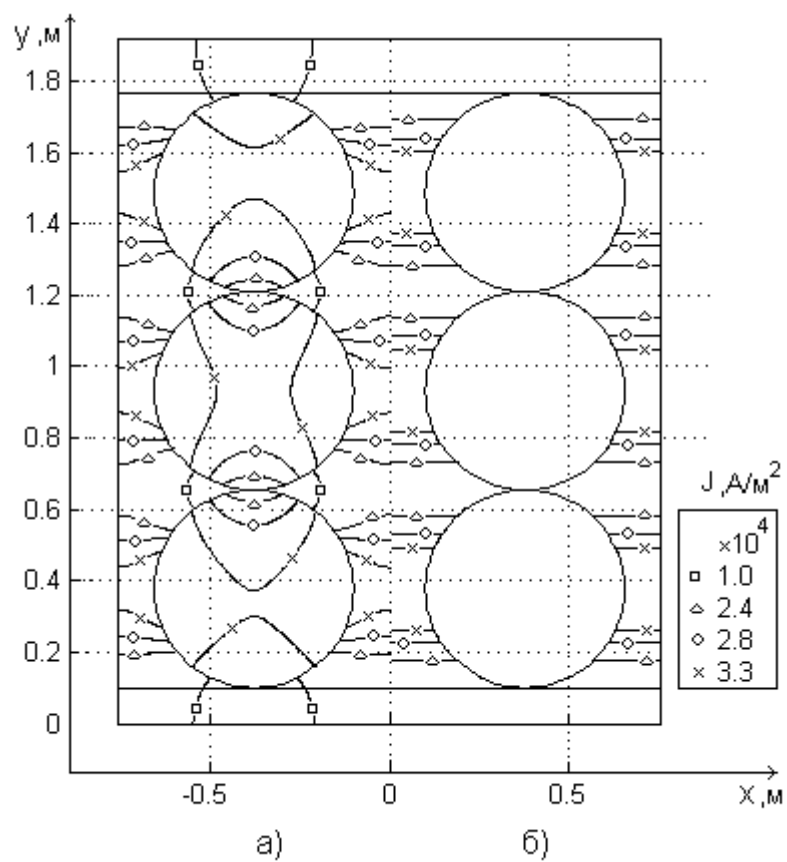


Рис. 4.5. Силіві лінії наприкінці ординарної кампанії

4.1.3. Спрощена модель електричного поля печі графітації.

Якісний аналіз розподілу густини струму в шунтувальних шарах показує, що використання існуючих струмопровідних матеріалів не забезпечує ефективного шунтування керна на всіх етапах кампанії й тому при спрощенні чисельної моделі величиною струму в шунтувальних шарах можна знехтувати.

Оскільки нагрівання електродних заготовок здійснюється практично повністю за рахунок теплоти, що утворюється у міжрядовій пересипці [3], доцільно розробити спосіб розрахунку розподілу густини струму в об'ємі пересипки в будь-який момент часу кампанії, що не вимагає ресурсомісткого розв'язання задачі (4.1) .. (4.8).

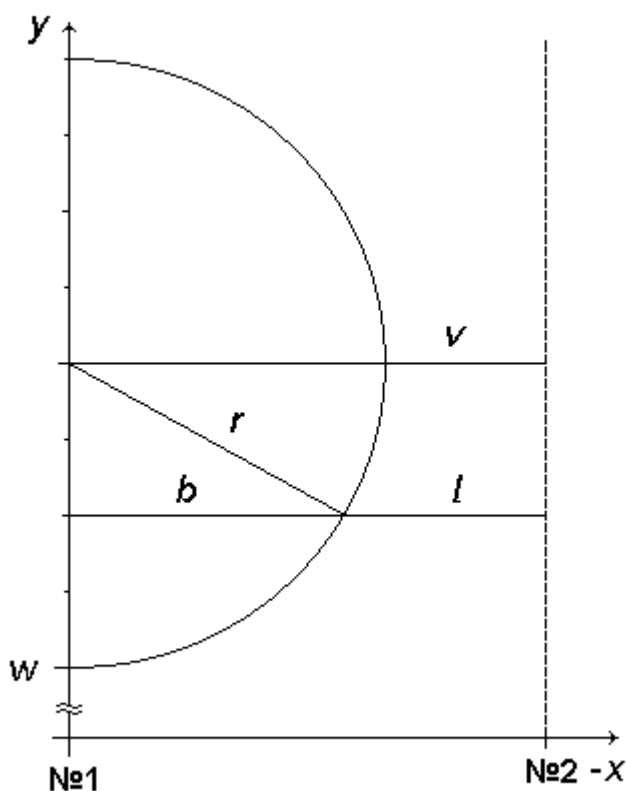


Рис. 4.6. Розрахункова схема РЕ

Аналіз результатів чисельного розв'язання (п. 4.1.2) дозволяє виділити в області, що моделюється, розрахунковий елемент (РЕ) керна як об'єм між поперечними січними площинами №1 і №2, що включає 1/4 об'єму електродної

заготовки (область 4 на рис. 4.1). Розрахункова схем РЕ при традиційному способі пакетування заготовок представлена на рис. 4.6. Тут: r – радіус електродної заготовки; v – половина ширини шаблона закладки електродних заготовок у керні; l – половина міжрядової відстані на рівні координати y (характеристична відстань); b – геометричний параметр, як функція просторової координати x ; w – висота закладки поздовжнього ряду електродних заготовок. Розмірність всіх величин – м.

Відповідно до розрахункової схеми характеристичну відстань як функцію координати x можна визначити з виразу:

$$l(x) = r + v - b(x); \quad (4.11)$$

де
$$b(x) = \sqrt{2(wx + rx - wr) - w^2 - x^2};$$

а
$$w = \begin{cases} w_0, & \text{при } 0 \leq (x - w_0) \leq 2r; \\ w_0 + 2r, & \text{при } 2r \leq (x - w_0) \leq 4r; \\ w_0 + 4r, & \text{при } 4r \leq (x - w_0) \leq 6r; \end{cases}$$

де w_0 – висота закладки першого поздовжнього ряду електродних заготовок (товщина нижнього шунтівного шару), м.

Для спрощення задачі припустимо [139], що силові лінії струму розташовані паралельно поздовжній осі керна і струм у шунтівних шарах відсутній. У цьому випадку можна оперувати поняттям густини струму $J(z)$, що є величиною нормальної (до поперечного перерізу) складової вектора густини струму $\mathbf{J}$, оскільки тангенціальна складова відсутня.

Визначимо розподіл густини струму, що проходить через переріз №2 в області РЕ. Площа F_{pe} цього перерізу визначається як: $F_{pe} = L_{pe} \cdot r$, де L_{pe} – половина довжини електродної заготівлі, м. Через переріз проходить струм I_{pe} , який дорівнює 1/6 величини I_m і середня густина струму J_{pe} у РЕ дорівнює

середній густина струму всього керна. Перепад напруги на РЕ ΔU_{pe} становить $1/4$ величини ΔU . Електричний опір РЕ можна визначити як:

$$R_{pe} = \frac{\rho_{nc}}{w+2r} \cdot L_{pe} \int_{w+r} \frac{dx}{l(x)}. \quad (4.12)$$

Дискретизуємо РЕ шляхом розбивки межрядового простору на n підоб'ємів однакової висоти w_d (див рис. 4.7а) у межах кожного з яких густину струму будемо вважати постійною. Згідно [3, с. 142] мінімальна висота підоб'єму дорівнює максимальному діаметру гранул пересипки (25 .. 30 мм).

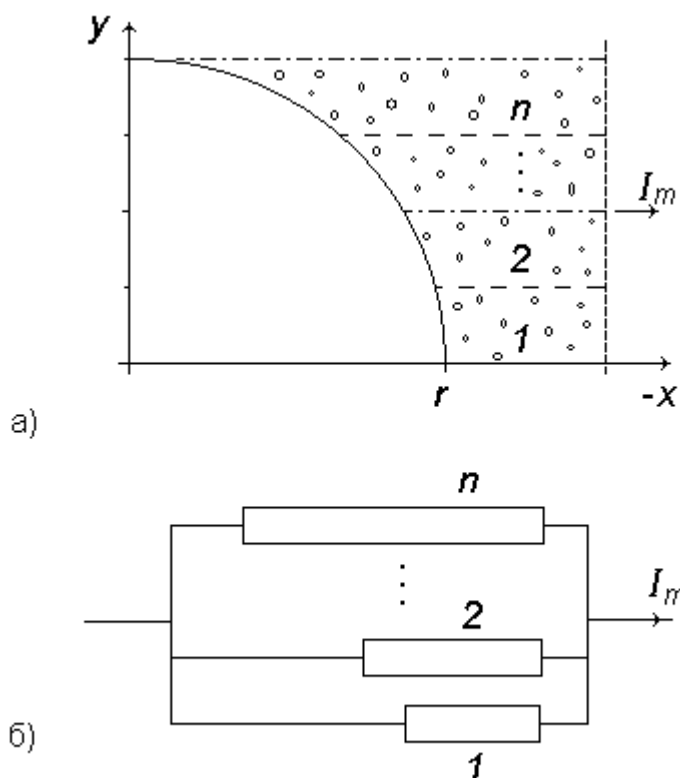


Рис. 4.7. Еквівалентна електрична схема заміщення РЕ

Тоді електричний опір i -го підоб'єму (див. рис. 4.7б) можна визначити як:

$$R_i = \frac{\rho_{nc} \cdot l(x_0 + iw_d)}{L \cdot w_d}, \quad (4.13)$$

де x_0 – висота розташування нижньої границі РЕ, для розглянутого РЕ $x_0 = w + r$. Вираз (4.12) у дискретній формі має вигляд:

$$R_{\text{pe}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} = \frac{\rho_{\text{nc}}}{L_{\text{pe}} \cdot w_d \sum_{i=1}^n \frac{1}{l(x_0 + i w_d)}}.$$

Струм всього РЕ відповідно до схеми заміщення визначається як:

$$I_{\text{pe}} = \sum_{i=1}^n I_i = \Delta U_{\text{pe}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (4.14)$$

Тоді струм i -го підоб'єму можна визначити як:

$$I_i = \frac{\Delta U_{\text{pe}}}{R_i} = \frac{I_{\text{pe}}}{R_i \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}}, \quad (4.15)$$

а густина струму в цьому підоб'ємі як:

$$J_i = \frac{I_i \cdot n}{F_{\text{pe}}}. \quad (4.16)$$

Перевірка адекватності розрахунку розподілу густини струму РЕ може бути здійснена відповідно до умови:

$$J_{\text{pe}} = \frac{I_{\text{pe}}}{F_{\text{pe}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i. \quad (4.17)$$

Поширюючи методику (4.11), (4.13) .. (4.16) на весь об'єм області, що моделюється, можна одержати наближений розподіл густини струму в керні печі

графітації. На рис. 4.3б і 4.5б наведені результати розрахунку розподілу густини струму за спрощеною моделлю на початку і наприкінці експериментальної кампанії графітації відповідно. Якісне зіставлення отриманих результатів з результатами чисельного моделювання відповідно до моделі (4.1) .. (4.8) (рис. 4.3а та 4.5а) свідчить про значну подібність розташування силових ліній, що дозволяє використовувати спрощену модель при оціночному розрахунку температурного поля печі графітації.

4.2. Математична модель температурного поля печі графітації

Електротермічну модель (3.2), (3.3) об'єкта за каналом $U \rightarrow T$ розглянемо як опис спряженої нелінійної нестационарної задачі тепло- та електропровідності в твердому суцільному середовищі [142, 156, 157].

4.2.1. Загальна форма моделі температурного поля.

На рис. 4.8 цифрами позначені контрольні точки. Точки 1 та 4 відповідають точкам встановлення термопар 16 та 18 в ординарній кампанії і точкам 20 та 23 в кампанії з форсованим регламентом, точки 2 та 3 відповідають точкам 21 та 20 в ординарній кампанії, а точки 5 та 6 відповідають точкам 5 та 8 в кампанії з форсованим регламентом (п.р. 2.2 та 2.3).

Виходячи з результатів моделювання електричного поля керна (п. 1.1.2) в просторі печі виділемо розрахунковий фрагмент (РФ), внутрішні границі якого утворено площинами симетрії, а саме, центральною поздовжньою вертикальною площиною xu , а також поперечними вертикальними січними площинами yz , що проведено через осі електродних заготовок вертикального ряду центральної частини керна та в області міжрядової кернової пересипки на однаковій відстані від суміжних вертикальних рядів заготовок (січні площини № 1 та № 2, п. 1.1.3). Зовнішні границі РФ співпадають із границями печі (рис. 4.8).

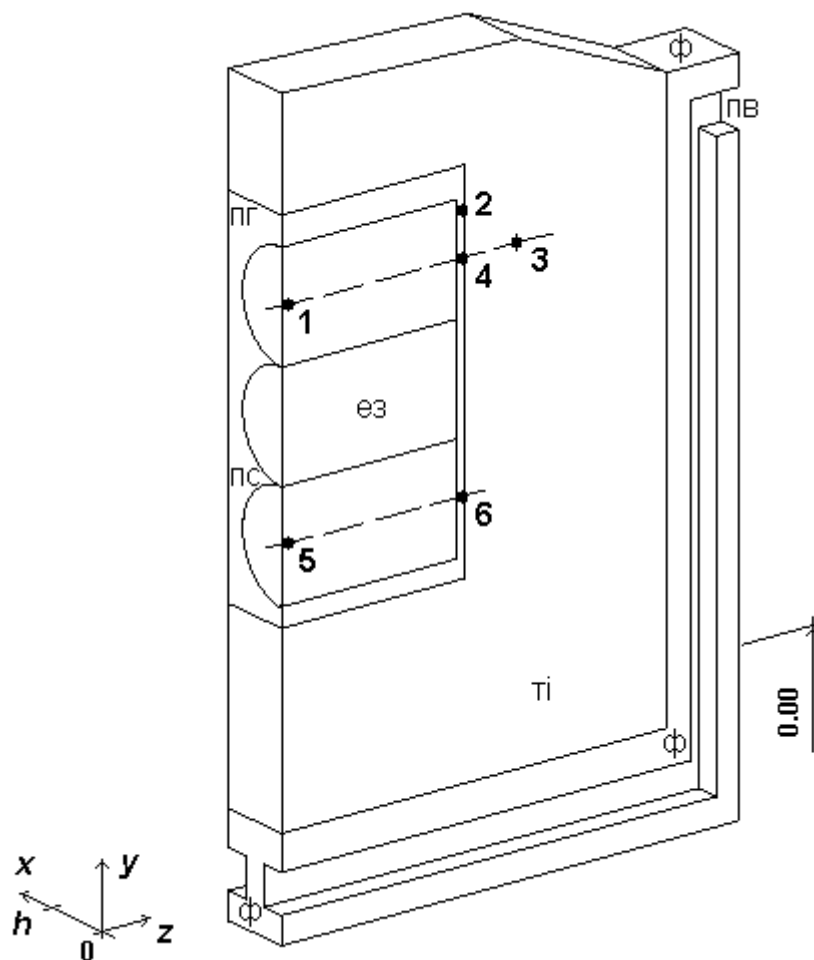


Рис. 4.8. Розрахунковий фрагмент електротермічної задачі

Такий РФ, крім області керна (електродних заготовок **ЕЗ** та пересипки **ПС** з шунтівним шаром **ПГ**), включає області теплоізоляційної шихти **ТІ** та цегляної футеровки **Ф** з повітряними каналами **ПВ** для охолодження (зміст просторових областей відповідає рис. 1.4, 2.1 та 4.1). Товщина h РФ (по координаті x) дорівнює половині товщини вертикального ряду заготовок та міжрядової пересипки. Наведений РФ описує 1/56 симетричної половини загального об'єму та відображує основні електричні і термічні процеси всієї печі графітації.

В динамічному відношенні РФ можна вважати складним нестационарним електротермічним об'єктом з просторовим розподілом параметрів, які мають істотну залежність від поточної температури. Якщо припустити, що кожна просторова область РФ представлена однородним ізотропним (в електричному сенсі) середовищем, то в загальному вигляді його температурне поле можна

описати системою нестационарних нелінійних рівнянь теплопровідності (параболічного типу) із внутрішнім джерелом теплоти при змінних граничних умовах у вигляді [109]:

$$c_i(T)\gamma_i \frac{\partial T}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\lambda_i(T) \cdot \operatorname{grad} T) \Big|_{\tau > 0} = Q_i(T, \tau), \quad (4.18)$$

де i – індекс області, що визначена на просторових координатах $\Omega_2 \in x, y, z, m$;
 c – питома ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);
 γ – густина, кг/м³;
 λ – теплопровідність, Вт/(м·К);
 Q – об’ємна густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³;
 T – розрахункова температура, К;
 τ – час, с.

Для замикання системи (4.18) запишемо крайові умови задачі.

Початкові умови:

$$T(x, y, z) \Big|_{\tau=0} = T_0, \quad (4.19)$$

де T_0 – початкова температура печі графітації.

Умови на границях контакту РФ із зовнішнім середовищем:

$$-\lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha_i \cdot (T - T_{\text{пв}}), \quad (4.20)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

$T_{\text{пв}}$ – температура зовнішнього середовища;

$\mathbf{n}$ – зовнішня нормаль до поверхні.

Граничні умови на площинах симетрії (внутрішніх границях РФ):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{z=0, x=0, x=h} = 0. \quad (4.21)$$

Умови на границях суміжних просторових областей РФ:

$$T_i = T_{i+1}, \quad \lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \mathbf{n}} = -\lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T_{i+1}}{\partial \mathbf{n}}. \quad (4.22)$$

Нагрівання керна забезпечується за рахунок тепловиділення на елементах опору РФ. Об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти для цих областей відповідно до (4.10) розраховується для кожного моменту часу, як:

$$Q_i(T) = \mathbf{J}_i^2 \rho_i(T), \quad (4.23)$$

де густина струму $\mathbf{J}$ для просторових областей визначається розв'язанням квазістаціонарної задачі електропровідності (4.1) .. (4.4) із граничними умовами (4.5) .. (4.8).

4.2.2. Оцінювання умов теплообміну на зовнішніх границях.

Для коректного формування крайових умов (4.20) розглянемо теплообмінні процеси на зовнішніх границях РФ.

На теплоізованих поверхнях (елементи конструкції печі, що знаходяться нижче нульової позначки, рис. 2.2) вважатимемо, що втрата теплоти відбувається виключно випромінюванням.

На поверхнях, що контактують з оточуючим повітрям, процес теплообміну здійснюється як випромінюванням, так і конвекцією.

При конвективному теплообміні коефіцієнт тепловіддачі α на відповідній поверхні можна визначити за його безрозмірним значенням (числом Нуссельта) за допомогою критеріальних рівнянь, як

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{пв}}(T)}{h};$$

де Nu – число Нуссельта для оточуючого повітря;

h – визначальний лінійний розмір, м;

$\lambda_{\text{пв}}$ – теплопровідність повітря, Вт/(м·К).

Для вільної конвекції при ламінарному русі повітря [109], що спостерігається на поверхнях бокових стін

$$\text{Nu} = 0.75(\text{Gr}_{\text{пв},h} \cdot \text{Pr}_{\text{пв}})^{0.25} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{пв}}}{\text{Pr}_{\text{ф}}} \right)^{0.25};$$

де $\text{Pr}_{\text{пв}}, \text{Pr}_{\text{ф}}$ – число Прандтля для оточуючого повітря та футеровки відповідно;

$h = 2.8$ м – визначальний розмір, в даному випадку висота стіни футеровки над нульовою позначкою (рис. 2.2);

$\text{Gr}_{\text{пв}}$ – число Грасгофа для оточуючого повітря;

Під газовідвідним зонтом на поверхні верхньої теплоізоляції конвекція має вимушений характер. Теплообмін в цьому випадку можна наближено представити, як конвекцію при обтіканні сферичної поверхні. Для цього скористаємось емпіричною залежністю [110]

$$\text{Nu} = 2 + 0.03 \cdot \text{Pr}^{0.33} \cdot \text{Re}^{0.54} + 0.35 \cdot \text{Pr}^{0.36} \cdot \text{Re}^{0.58};$$

де Re – число Рейнольдса.

В повітряних каналах футеровки, що мають прямокутний переріз, коефіцієнт тепловіддачі можна визначити з залежності [110]

$$\text{Nu} = 1.85 \left(\frac{\text{Pe} \cdot D}{h} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_{\text{ф}}}{\mu_{\text{пв}}} \right)^{-0.1};$$

де Re – число Пекле;

$D = 0.153$ м – визначальний розмір, в даному випадку еквівалентний діаметр повітряного каналу;

$h = 4.2$ м – довжина каналу;

$\mu_{\text{ф}}, \mu_{\text{пв}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря при температурі футеровки та при середній температурі в каналі відповідно, Па·с.

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням скористаємось відомими залежностями [111]

$$\begin{cases} \alpha = C \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}; \\ C = \varepsilon \cdot C_0; \\ \varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}; \end{cases}$$

де T_1, T_2 – температури поверхонь, між якими відбувається теплообмін, К;

C – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²·К⁴), для абсолютно чорного тіла $C_0 = 5.67$ Вт/(м²·К⁴);

ε – ступінь чорноти випромінювальної системи;

F – площі поверхонь випромінювальної системи, м².

При випромінюванні з відкритої поверхні в оточуюче середовище (бокові стіни) прийmemo $T_1 = 50$ °С, $T_2 = T_{\text{пв}} = 30$ °С, $\varepsilon = \varepsilon_1 = 0.8$. Тоді наведений коефіцієнт тепловіддачі, що враховує втрати теплоти конвекцією та випромінюванням, оцінюється як $\alpha_{\text{ф}} = 7$ Вт/(м²·К).

При випромінюванні через повітряний канал $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.8$, $F_1 = F_2$. Якщо вважати максимальний перепад температур між стінами каналу 120 °С, поглинальну здібність охолоджуючого повітря 20 % (стандартний рівень

запиленості, п. 2.2.3) та його температуру $T_{\text{пв}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ сталими значеннями, то наведений коефіцієнт тепловіддачі буде залежити тільки від швидкості потоку охолоджуючого повітря в каналі. Для швидкості 3.4 м/с наведений коефіцієнт тепловіддачі оцінено як $\alpha_{\text{пв}} = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, для швидкості 0.2 м/с (випадок, коли охолоджувальна система вимкнута) $\alpha_{\text{пв}} = 5.4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ і для швидкості 10 м/с (гіпотетичний випадок) $\alpha_{\text{пв}} = 8.2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

При випромінюванні з поверхонь нижче нульової позначки $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.65$; $F_1 = F_2$ коефіцієнт тепловіддачі оцінюється як $\alpha_{\text{ф0}} = 3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

При оцінюванні умов тепловіддачі на поверхні верхньої теплоізоляції експериментально визначити розрідження під газовідвідним зонтом не вдалось, тому прийнято граничне значення числа $Re = 3 \cdot 10^5$. В цьому випадку для $T_1 = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = T_{\text{пв}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = \varepsilon_1 = 0.8$ наведений коефіцієнт тепловіддачі оцінюється як $\alpha_{\text{т1}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

4.2.3. Числове моделювання температурного поля керна.

Початкова ідентифікація параметрів об'єкта здійснена узагальненням великого масиву літературних джерел.

Теплофізичні параметри пічних матеріалів визначено за даними [69–71, 73, 75, 77, 79, 99, 112–120]. Відомості про ПЕО пічних матеріалів взято з [68, 69, 75, 78, 79, 99, 120]. Густина шихтових матеріалів визначалась також за [121, 122].

На жаль переважна більшість джерел надає дані про властивості матеріалів лише при низьких температурах і тільки деякі дослідження (наприклад, [72, 76, 80, 123, 124]) розглядають весь температурний діапазон графітації.

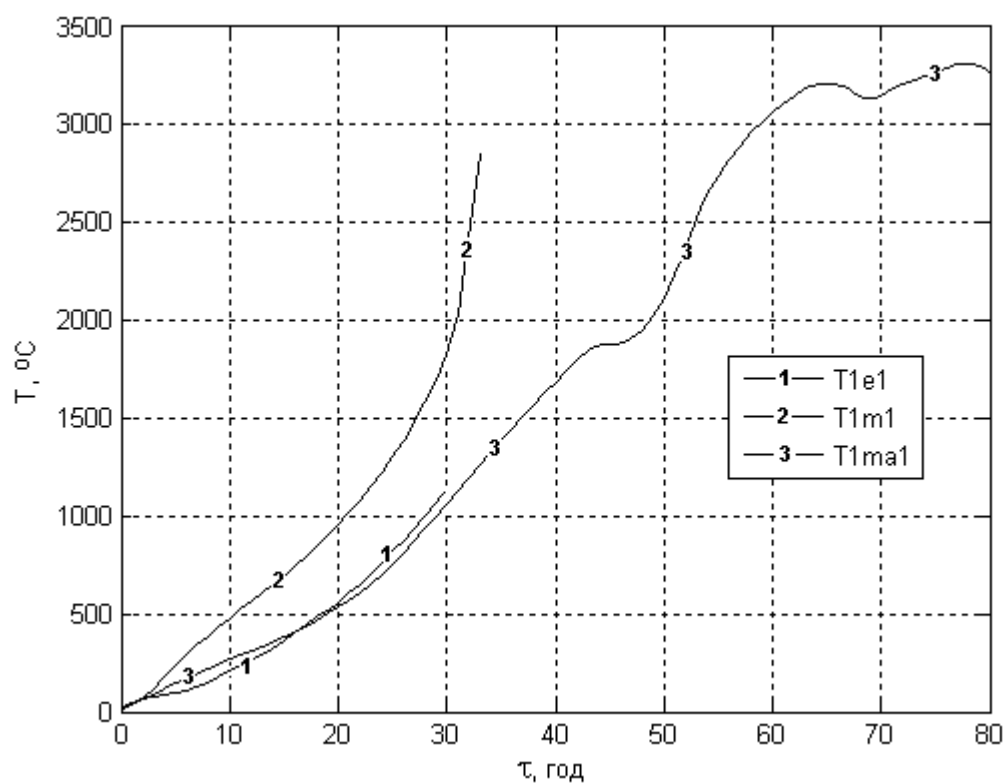


Рис. 4.9. Динаміка температури в центрі заготовки верхнього ряду,
ординарний регламент

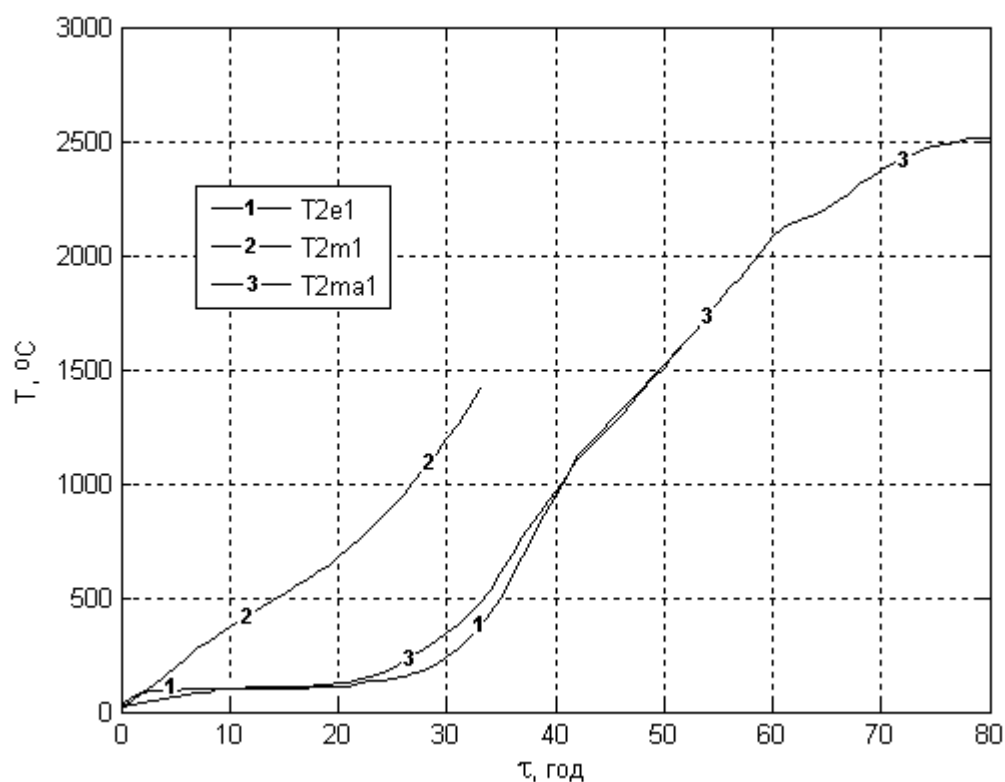


Рис. 4.10. Динаміка температури верхньої частини преиферії заготовки верхнього
ряду, ординарний регламент

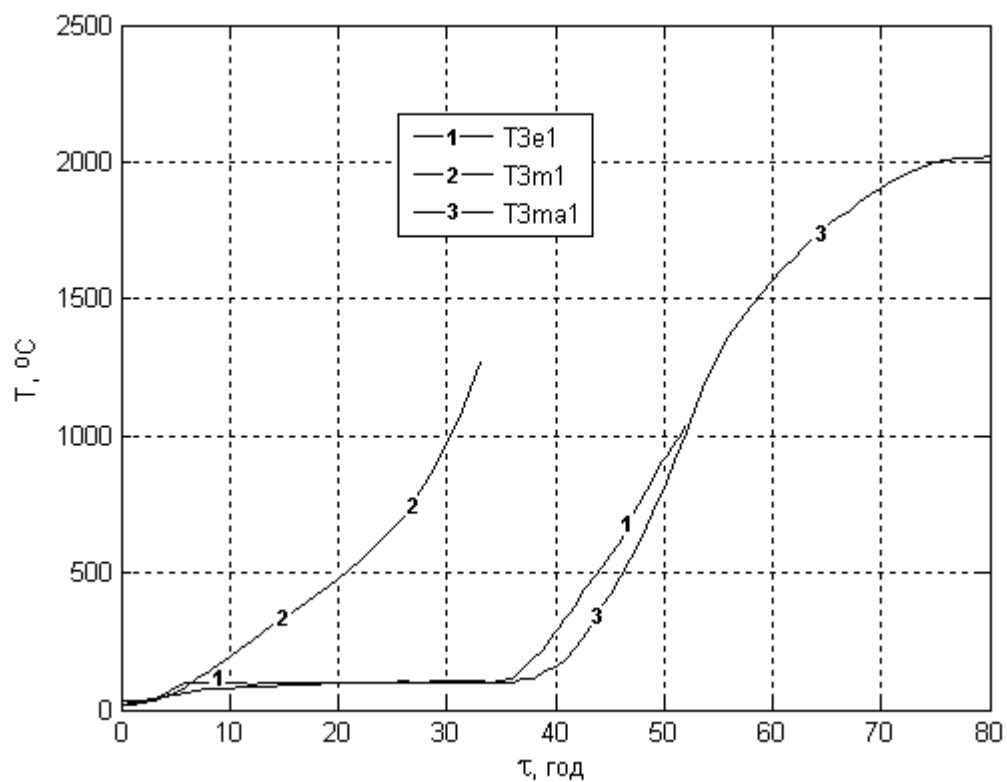


Рис. 4.11. Динаміка температури в теплоізоляції біля заготовки верхнього ряду, ординарний регламент

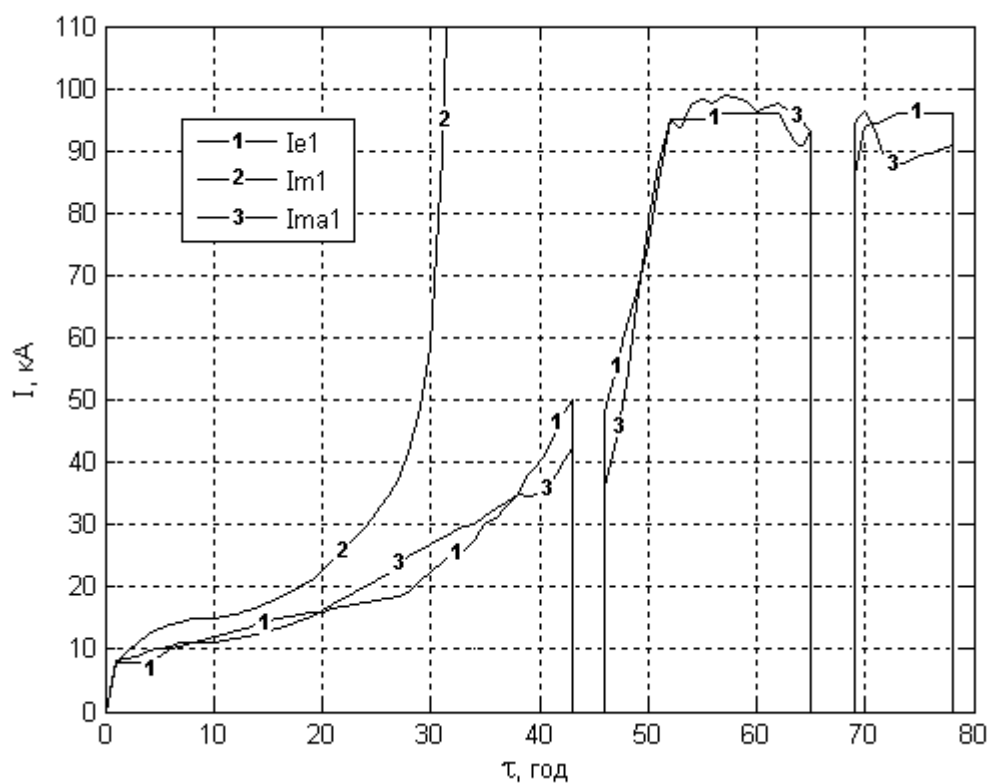


Рис. 4.12. Динаміка сили струму печі графітації, ординарний регламент

Відсутні дані про параметри (як функції температури) визначались:

1. Шляхом розв'язання зворотної задачі теплопровідності на математичній моделі з використанням експериментальних даних.
2. Шляхом визначення властивостей шихтових матеріалів на дослідній установці НДЦ "РТ" в діапазоні до 1100 °С.
3. Шляхом екстраполяції в область високих температур за аналогією з відомими залежностями [67, 74, 125].

Результати початкової ідентифікації наведено в додатку В.

При чисельному моделюванні типового процесу графітації використано дані, отримані під час експериментальної кампанії з ординарним регламентом підведення потужності $P_{e1}(\tau)$ (рис. 2.9, тут і далі криві з індексом "о"). Динаміку керувального сигналу (напруги печі $U_{e1}(\tau)$), що забезпечив вказаний регламент, зображено на рис. 2.10. Струм печі $I_{e1}(\tau)$, отриманий в цій кампанії зображено на рис. 2.11.

Для врахування ефекту сублімації вуглецю при температурах, які перевищують 2800 °С, замість дійсної теплоємності c_i використовується її ефективне значення. При розрахунках для температурного діапазону більше 3000 °С величину параметра c_i збільшуємо в 1.2 .. 1.5 рази [38].

Густину γ_i матеріалів просторових областей вважатимемо незмінною впродовж всієї кампанії.

Початкову температуру печі (граничні умови (4.19)) та температуру зовнішнього середовища (граничні умови (4.20)) приймемо однаковими: $T_{пв} = T_0 = 20$ °С. Умови теплообміну на зовнішніх границях та в повітряних каналах візьмемо відповідно до п. 4.2.2.

Для формування граничних умов (4.8) задамо перепад напруги на РФ, як: $U_m(\tau) = K \cdot U_{e1}(\tau) / 56$; при електричному ККД печі $K = 0.776$ (п. 1.1.2). Розв'язання електро-термічної задачі (4.1) .. (4.8), (4.18) .. (4.23) з вказаним вхідним сигналом здійснимо за допомогою алгоритму [126, 156, 157], що базується на методі граничних елементів.

Результати моделювання температури $T_{xm1}(\tau)$ в контрольних точках 1, 2 та 3 (рис. 4.8) наведено на рис. 4.9, 4.10 та 4.11 відповідно. Одночасно з температурним полем відповідно до (4.9) визначався розрахунковий струму печі, як: $I_{m1}(\tau) = 2 \cdot I_m(\tau)$. Його динаміку наведено на рис. 4.12.

На рисунках для порівняння наведено також відповідні експериментальні дані. Цілком очевидно, що отримані результати моделювання не можуть вважатися задовільними. Причиною цього є недостатньо точна інформація про властивості матеріалів просторових областей РФ, переважно через нестабільний вміст вологи в коксовій пересипці ПС, ПГ та теплоізоляційній шихті Т І.

Дійсно, аналіз експериментальних даних (див. також рис. 2.15 та 2.16) показує, що в околі позначки 100°C на кривих $T_{2e1}(\tau)$ та $T_{3e1}(\tau)$ існує динамічне запізнювання, що свідчить про значний вміст вологи в печі.

4.2.4. Ентальпійна форма моделі температурного поля.

В термодинамічному сенсі випаровування вологи є фазовим переходом І-го роду, що супроводжується поглинанням теплоти. Для урахування цього явища представимо рівняння (4.18) для просторових областей, матеріал яких має істотний вміст вологи, в ентальпійній формі [127, 128, 157]:

$$\frac{\partial H_i(T)}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\lambda_i(T) \cdot \operatorname{grad} T) \Big|_{\tau > 0} = Q_i(T, \tau); \quad (4.24)$$

$$H_i(T) = \int_0^T \Psi_i(T) dT, \quad (4.25)$$

де $H(T)$ – тепловміст відповідної просторової області РФ;

а функціонал $\Psi(T)$, Дж/(м³·К), та теплопровідність $\lambda(T)$ визначаються таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{при } T < T_{\pi} - \frac{\Theta}{2}: & \Psi(T) = c_b(T)\gamma_b(T); \quad \lambda(T) = \lambda_b(T); \\ \text{при } T_{\pi} - \frac{\Theta}{2} \leq T \leq T_{\pi} + \frac{\Theta}{2}: & \Psi(T) = \frac{c_b(T)\gamma_b(T) + c_c(T)\gamma_c(T)}{2} + \frac{L_{\pi}v_m}{\Theta}\gamma_b(T); \\ \text{при } T > T_{\pi} + \frac{\Theta}{2}: & \Psi(T) = c_c(T)\gamma_c(T); \quad \lambda(T) = \lambda_c(T), \end{array} \right. \quad (4.26)$$

де b, c – індекси теплофізичних властивостей вологих та сухих матеріалів відповідно;

T_{π} – температура випаровування (для води $T_{\pi} = 373$ K);

Θ – температурний інтервал згладжування, K;

v_m – середній масовий вологовміст в матеріалі просторової області;

L_{π} – теплота пароутворення (для води $L_{\pi} = 2256800$ Дж/кг).

Теплопровідність вологих матеріалів, використаних в печі, можна визначити, припустивши, що її відносне збільшення (в порівнянні з теплопровідністю сухих матеріалів) подібно такому явищу в пористих будівельних матеріалів з густиною до 1200 кг/м^3 [67]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_b(T) = \lambda_c(T) \cdot (-1159.558 \cdot v_v^4 + 627.865 \cdot v_v^3 - 124.383 \cdot v_v^2 + 17.102 \cdot v_v + 1); \\ \text{при } v_v \leq 0.3, \end{array} \right. \quad (4.27)$$

де v_v – середній об'ємний вологовміст в матеріалі просторової області, який визначається так:

$$v_v = v_m \cdot \frac{\gamma_b}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (4.28)$$

густина води $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Питома теплоємність $c_b(T)$ вологого матеріалу визначається так:

$$c_b(T) = c_c(T) \cdot (1 - v_m) + c_{H_2O} \cdot v_m, \quad (4.29)$$

де питома теплоємність води $c_{H_2O} = 4216 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Для визначення густини вологого матеріалу, враховуючи, що об'єм сухої речовини значно перевищує об'єм води в просторовій області, можна скористатися спрощеною формулою:

$$\gamma_b(T) \approx \frac{\gamma_c(T)}{1 - v_m}. \quad (4.30)$$

Слід відзначити, що теплофізичні властивості $c(T)$ та $\lambda(T)$ матеріалів просторових областей РФ, на відміну від $H(T)$, мають суттєвий нелінійний характер. Тому використання рівняння теплопровідності в формі (4.24) значно покращує збіжність числових алгоритмів, використаних при моделюванні.

Розв'язання задачі (4.1) .. (4.8), (4.18) .. (4.30) вказаним методом з вхідним сигналом на основі експериментальних даних $U_{el}(\tau)$ при середньому масовому вологовмісті коксової пересипки $v_{nc} = 0.03$ та теплоізоляційної шихти $v_{ti} = 0.1$ дає розрахункове температурне поле та відповідний розрахунковий струм $I_{mal}(\tau)$ печі. Результати моделювання динаміки струму і температурного поля $T_{xmal}(\tau)$ в контрольних точках 1, 2 та 3 зображені на рис. 4.9 .. 4.12.

При використанні комп'ютера з тактовою частотою 2.7 ГГц та оперативною пам'яттю 2 Гб розрахунок однієї години процесу зайняв від 18 до 52 с в залежності від налаштувань обчислювального алгоритму.

4.2.5. Адаптивна модель температурного поля.

Теплофізичні та електричні параметри моделі (4.1) .. (4.8), (4.18) .. (4.30) для різних кампаній графітації не є сталими, а їх попереднє визначення з необхідною точністю в лабораторних умовах неможливе через високу складність та значні

технологічні витрати. Вказані параметри при створенні системи керування розглядаються як внутрішні збурення об'єкта (п.р. 3.1).

Зменшити вплив неповної інформації про параметри моделі на якість кінцевого результату можна шляхом адаптації тих параметрів, до яких модель має найбільшу чутливість [104].

Аналіз числового експерименту показав, що до таких параметрів належать: середній масовий вологовміст сипких матеріалів печі (коксової пересипки $v_{\text{пс}}$ і теплоізоляційної шихти $v_{\text{ті}}$) та ПЕО коксової пересипки $\rho_{\text{пс}}(T)$ (яка є основним елементом опору керування).

Для адаптації параметрів моделі доцільно обрати поточний струм печі I_a , як вихідний сигнал об'єкта, що є комплексним показником його енергетичного стану (п.р. 3.3). Крім того, поточний струм (на відміну від температури в характерних точках печі) підлягає обов'язковому контролю в кожній кампанії графітації.

Оскільки об'єкт керування працює в динамічному режимі і якість поточної ідентифікації його параметрів можна оцінити лише за деякий час, процедуру адаптації параметрів $\mathbf{A}$ доцільно реалізувати, як розв'язання оптимізаційної задачі, в якій цільова функція $Y_2(\mathbf{A})$ представлена квадратичним інтегральним критерієм якості моделі виду [104]:

$$Y_2(\mathbf{A}) = \int_0^{\tau_a} [I_a - I_m(\mathbf{A})]^2 d\tau \rightarrow \min, \quad (4.31)$$

де τ_a – поточний час, с.

Якщо вважати властивість $\rho_{\text{пс}}(T)$ наперед відомою, то вектор параметрів можна сформулювати таким чином:

$$\mathbf{A} = [v_{\text{пс}} \quad v_{\text{ті}}]^T. \quad (4.32)$$

Розв'язання задачі (4.31), (4.32) методом найшвидшого спуску [129] дає вже представлені (п. 4.2.4) значення середнього масового вологовмісту сипких матеріалів печі. Слід відзначити, що це лише оцінки, які не обов'язково співпадають з дійсними значеннями, але їх використання при моделюванні частково компенсує похибки (викликані неповною інформацією про інші параметри) і здатне забезпечити необхідну точність моделі.

Близький характер відгуку моделі на зміни параметрів $v_{\text{пс}}$ та $v_{\text{ті}}$ забезпечує форму ліній рівня цільової функції, близьку до окружності, чим обумовлений порівняно невеликий обсяг розрахунків в процедурі адаптації.

У випадку, коли параметри $v_{\text{пс}}$, $v_{\text{ті}}$ точно визначені в лабораторних умовах, адаптації підлягає температурна залежність ПЕО коксової пересипки, яку із задовільною точністю можна описати поліномом п'ятого порядку виду (див. додаток В):

$$\rho_{\text{пс}}(T) = k \cdot (T^5 a_5 + T^4 a_4 + T^3 a_3 + T^2 a_2 + T a_1 + a_0), \quad (4.33)$$

де k – масштабний коефіцієнт.

Для адаптації семи коефіцієнтів наявних обчислювальних ресурсів недостатньо, тому доцільно організувати часткову адаптацію параметра $\rho_{\text{пс}}(T)$:

- а) молодших коефіцієнтів поліному (4.33);
- б) масштабного коефіцієнту k ;
- с) деякої комбінації варіантів а) та б).

В цьому випадку вектор параметрів може мати, наприклад, такий вигляд:

$$\mathbf{A} = [k \quad a_0 \quad a_1]^T; \text{ при } [a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5]^T = \text{const}. \quad (4.34)$$

Розв'язання задачі (4.31) з вектором параметрів (4.34) дає результат, близький до отриманого з вектором параметрів (4.32) при істотному зростанні

часу та обсягу обчислень. Тому в адаптивній моделі температурного поля печі графітації застосовано алгоритм, заснований на (4.31), (4.32).

Результати моделювання температурного поля РФ печі $T_{ma1}(x, y, z, \tau)$ при ординарному регламенті підведення потужності наведено в додатку Д.

Для оцінки точності моделювання ретельніше розглянемо периферію заготовок верхнього ряду (контрольна точка 4, рис. 4.8). Ця точка є критично важливою, оскільки визначає радіальний градієнт температур у виробі. Динаміка температури в точці 4 наведена на рис. 4.13. Для порівняння на рисунку також наведені експериментальні дані, отримані термопарним та пірометричним методом (див. також рис. А.11).

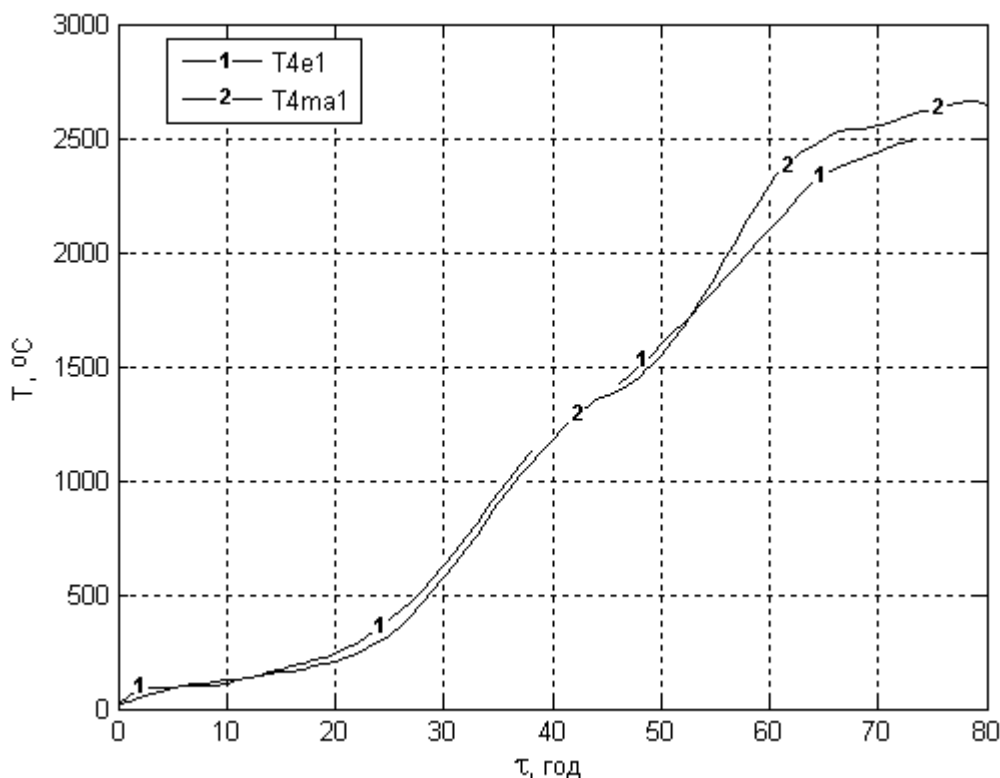


Рис. 4.13. Динаміка температури на периферії заготовки верхнього ряду, ординарний регламент

Порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних даних (рис. 4.9 .. 4.13) показує, що максимальна відносна похибка визначення температури в заготовках складає 9.7 %, а похибка визначення сили струму - 10.4 %. Отримані результати свідчать, що похибка адаптивної моделі не

перевищує заявленої похибки вимірювань (див. п.р. 2.2.), що дозволяє вважати точність моделі задовільною.

Для перевірки адекватності моделі використаємо експериментальні дані, отримані під час кампанії з форсованим регламентом підведення потужності $P_{e2}(\tau)$ (рис. 2.9, тут і далі криві з індексом індексом “f”). Динаміку керуючого сигналу $U_{e2}(\tau)$ зображено на рис. 2.10, а струм печі $I_{e2}(\tau)$, отриманий в цій кампанії зображено на рис. 2.11.

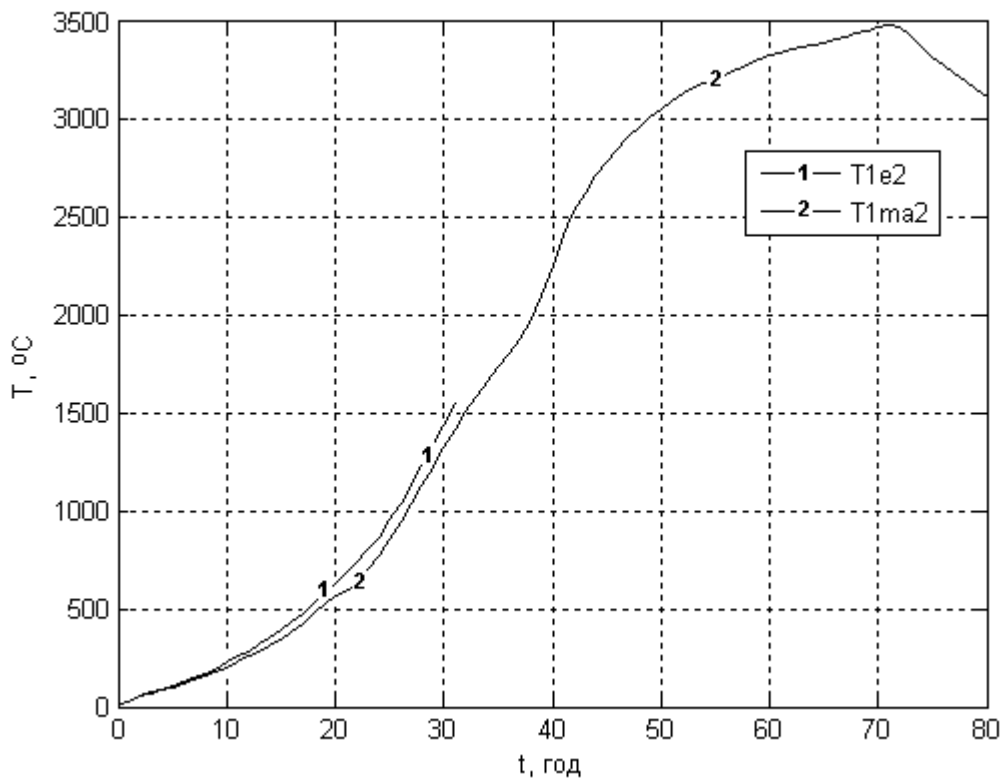


Рис. 4.14. Динаміка температури в центрі заготовки верхнього ряду, форсований регламент

Перевірочний розрахунок моделі (4.1) .. (4.8), (4.18) .. (4.30), (4.31), (4.32) при використанні вхідного сигналу на основі експериментальних даних $U_{e2}(\tau)$ при $K = 0.776$ дає розрахункове температурне поле $T_{ma2}(x, y, z, \tau)$ та відповідний розрахунковий струм $I_{ma2}(\tau)$ печі. Адаптація середнього масового вологовмісту коксової пересипки та теплоізоляційної шихти за даними $I_{e2}(\tau)$ дає такі значення: $v_{nc} = 0.08$; $v_{ti} = 0.12$.

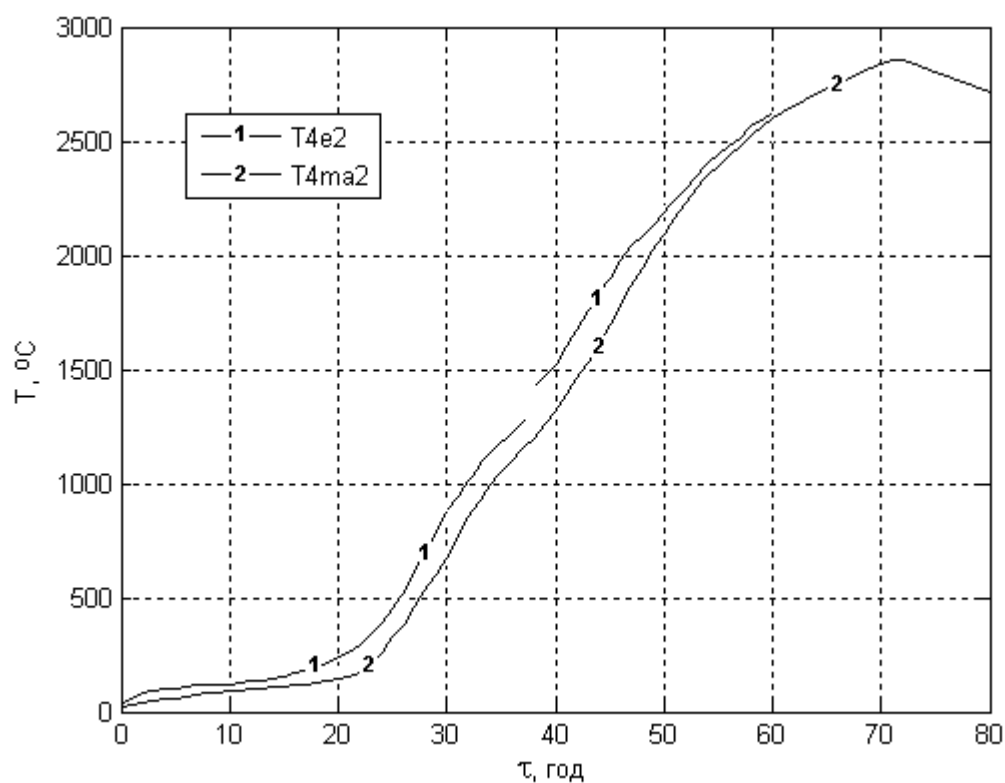


Рис. 4.15. Динаміка температури на преиферії заготовки верхнього ряду, форсований регламент

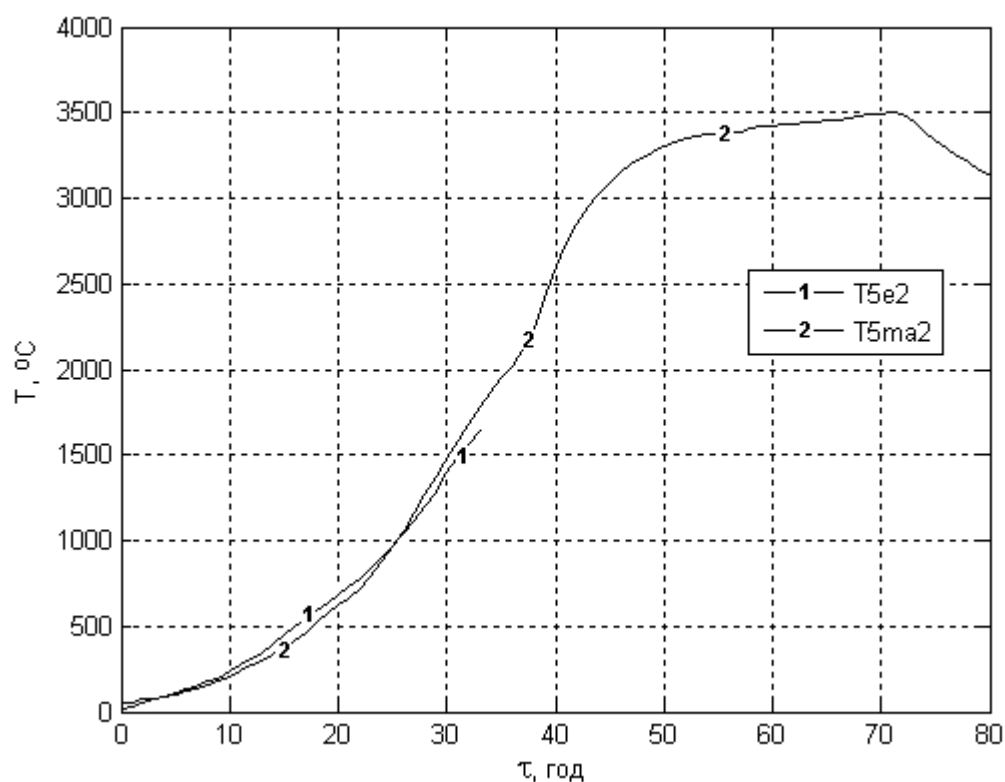


Рис. 4.16. Динаміка температури в центрі заготовки нижнього ряду, форсований регламент

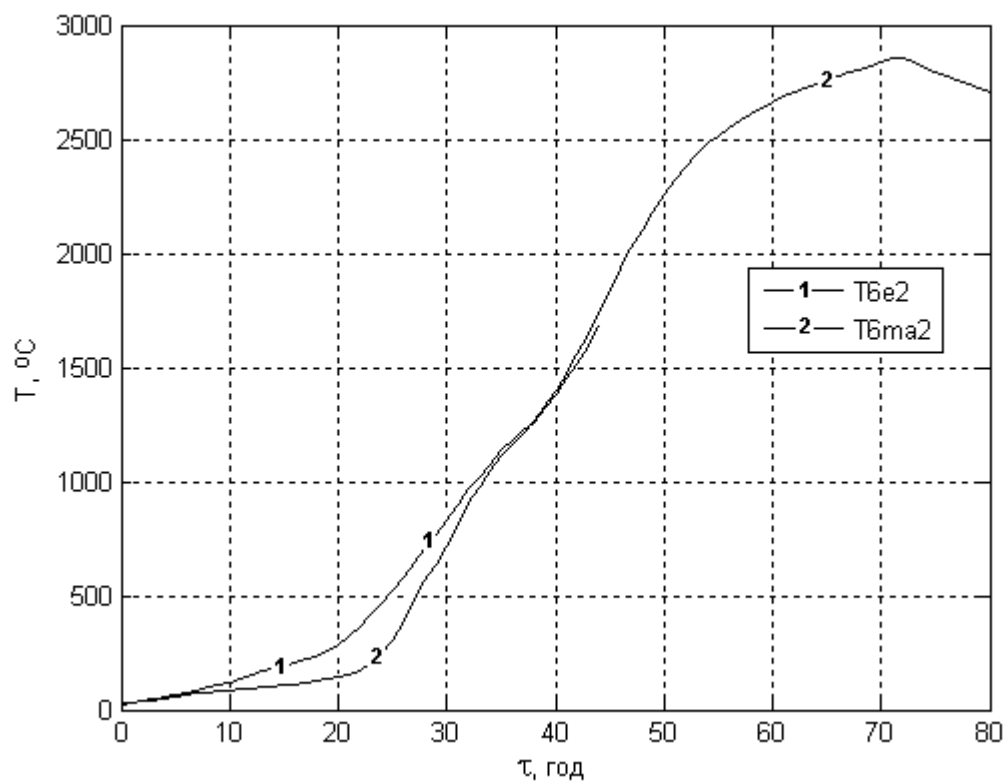


Рис. 4.17. Динаміка температури на преиферії заготовки нижнього ряду, форсований регламент

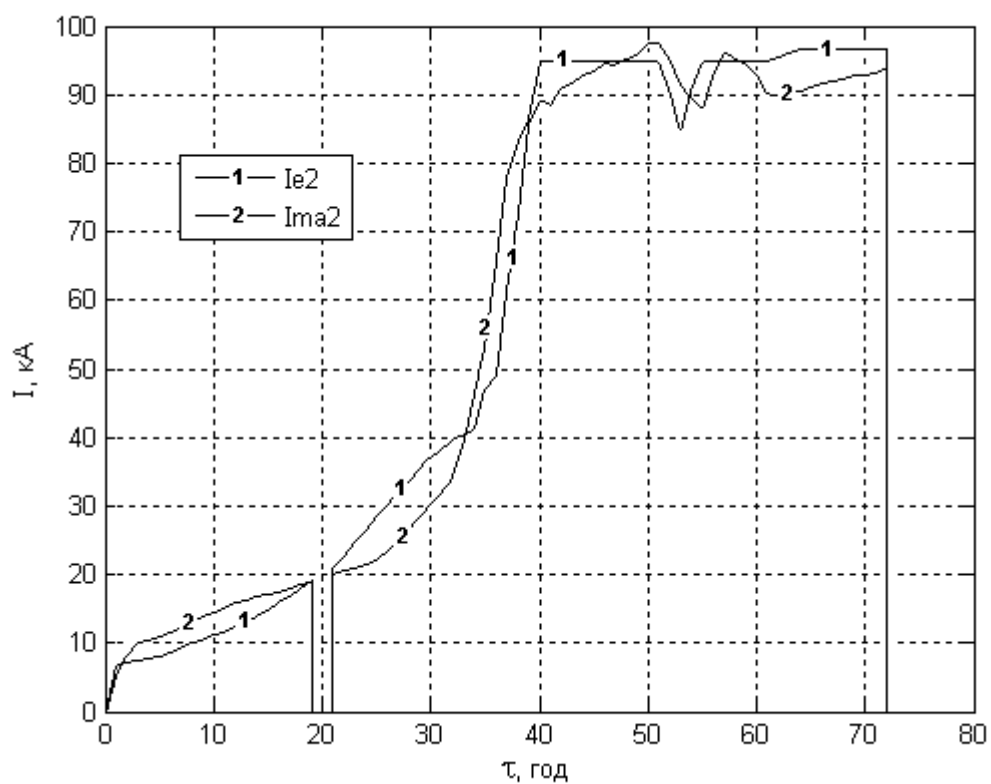


Рис. 4.18. Динаміка сили струму печі графітації, форсований регламент

Результати моделювання температурного поля $T_{xma2}(\tau)$ в контрольних точках 1, 4, 5 та 6, що визначають градієнт температур в заготовках верхнього та нижнього горизонтального ряду, зображені на рис. 4.14 .. 4.17. На рисунках також зображено відповідні експериментальні дані. Для точки 4 також зображено дані, отримані пірометричним методом (за аналогією з рис. 4.13). Розрахунковий струм зображено на рис. 4.18.

Порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних даних показує, що відносна похибка визначення температури в цьому випадку не перевищує 8.3 %, а похибка визначення сили струму не перевищує 9.4 %, що свідчить про задовільну адекватність адаптивної моделі.

4.2.6. Оцінювання зовнішніх збурень печі графітації.

За допомогою числового експерименту розглянемо, як впливають максимальні зовнішні збурення на температуру ядра печі графітації.

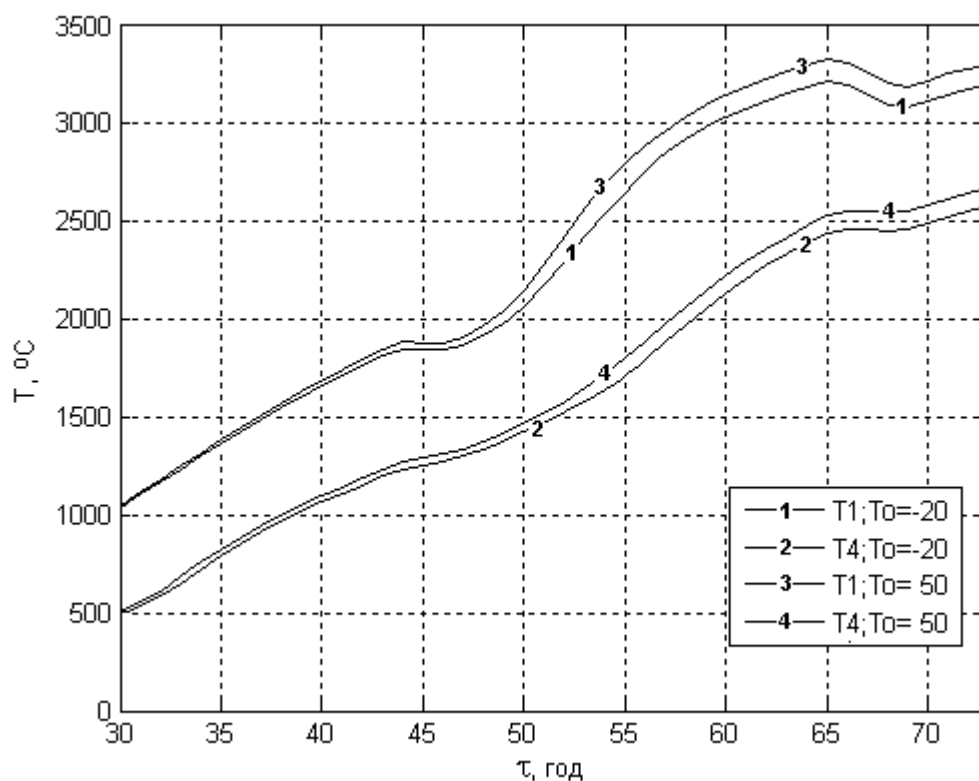


Рис. 4.19. Динаміка температури заготовок верхнього ряду при різній температурі оточуючого середовища

Для цього отримаємо оцінку динаміки температурного поля печі в кампанії з ординарним регламентом (п. 4.2.5) при початкових умовах (4.19) та граничних умовах (4.20) для зовнішніх стін футеровки вище нульової позначки та в охолоджувальних каналах, що відповідають максимальним сезонним коливанням середньої температури оточуючого середовища в цеху графітації біля печей: $T_0 = T_{\text{пв}} = -20 \dots 50 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Як видно з рис. 4.19 (контрольні точки відповідають схемі на рис. 4.8), максимальна різниця в температурі контрольної точки при коливаннях температури оточуючого середовища складає $119 \text{ } ^\circ\text{C}$, або 4 %, що не перевищує заявленої точності моделі. Такі зовнішні збурення можна вважати неістотними, а їх можливий вплив буде компенсовано адаптивною процедурою.

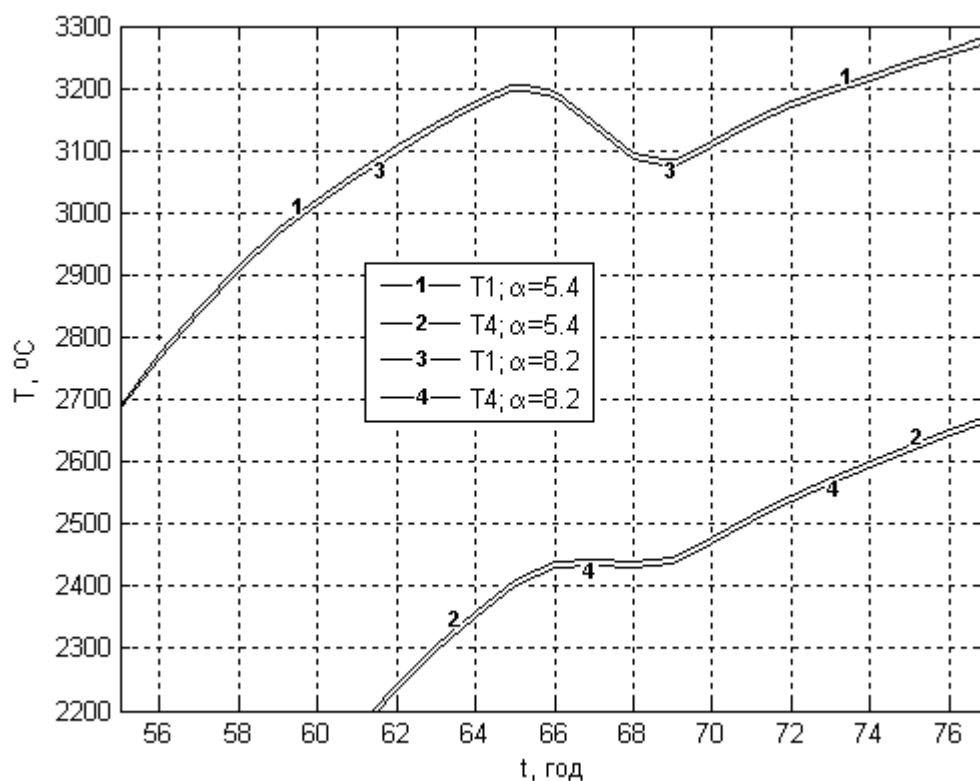


Рис. 4.20. Динаміка температури заготовок верхнього ряду при різних умовах охолодження футеровки

Для визначення впливу режимів охолодження футеровки визначимо оцінку динаміки температурного поля печі в кампанії з ординарним регламентом при

початкових умовах (4.19) в охолоджувальних каналах, що відповідають максимально можливим коливанням швидкості повітряного потоку (п. 4.2.2): $\alpha_{\text{пв}} = 5.4 \dots 8.2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Як видно з рис. 4.20, максимальна різниця в температурі контрольної точки при зміні швидкості повітряного потоку складає лише 11 °С, або 0.4 %. Отриманий результат свідчить про те, що збуреннями, викликаними зміною режиму охолодження можна знехтувати, а швидкість охолоджувального повітря в каналах футеровки не можна розглядати як додаткове керування об'єкта (п. 1.7.2).

4.3. Математична модель поля термічних напружень

Врахування обмежень (3.9) та (3.10), що впливають на швидкість протікання стадій кампанії графітації, потребує попереднього визначення відповідних змінних стану об'єкта: σ та β (рис. 3.1). Оцінка вказаних станів під час кампанії графітації необхідна для розв'язування часткових задач керування (п.р. 3.2) та передбачає створення їх математичних моделей [144, 148].

4.3.1. Дослідження умов виникнення термічних напружень.

Як відомо (п. 1.7.4), нестационарне просторово-розподілене температурне поле спричиняє термічні напруження, а інтенсифікація процесу графітації збільшує нерівномірність розподілення температурного поля, а, отже, збільшує і термічні напруження у виробках [150, 157].

Аналіз експериментальних даних (додатки А та Б) і результатів числового моделювання температурного поля печі графітації (додаток Д) показує, що найшвидше в керні розігріваються заготовки середнього горизонтального ряду. Розглянемо цю просторову област $\Omega_3 \in x, y, z$ детальніше, як складову РФ печі (рис. 4.21).

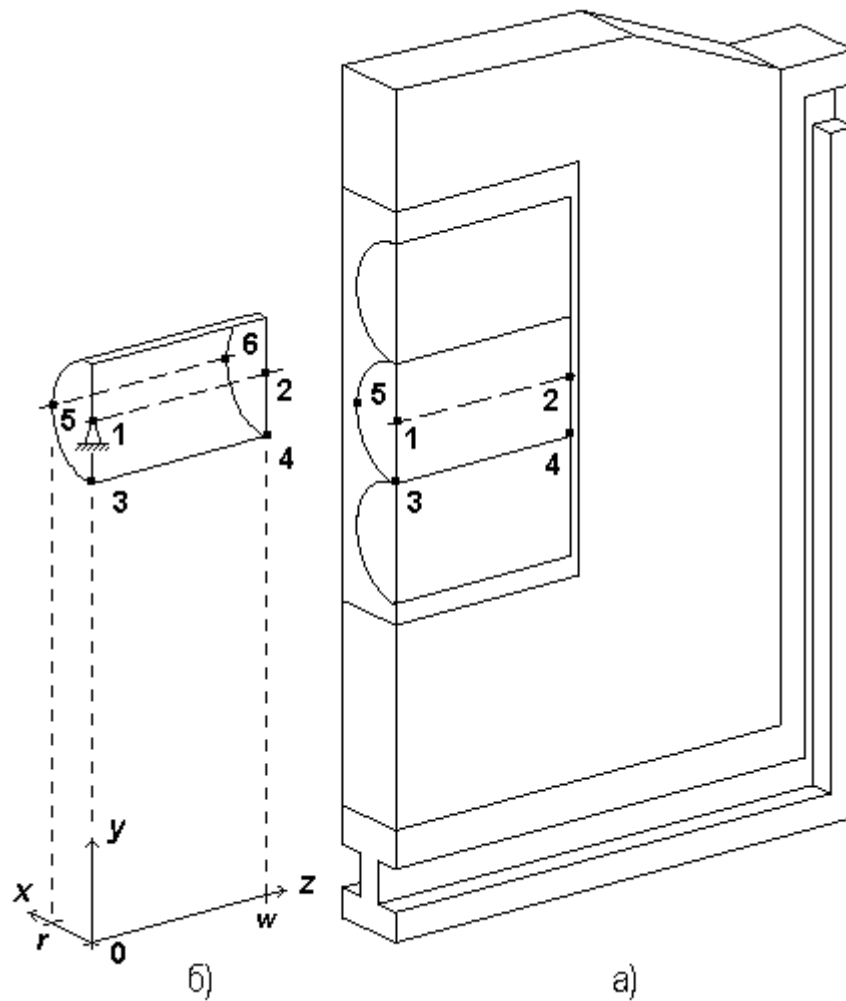


Рис. 4.21. Розрахунковий фрагмент механічної задачі

На рис. 4.21 цифрами позначені контрольні точки, що дозволяють оцінити максимальні перепади температур в осьовому (z) та радіальних (індекс r для осей x та y) напрямках центру (індекс c) та периферії (індекс p) заготовки. За допомогою моделі температурного поля (п.р. 4.2) визначимо динаміку температури в контрольних точках для експериментальної кампанії з ординарним регламентом підведення потужності (динаміку керуючого впливу $U_{e1}(\tau)$ див. на рис. 2.10).

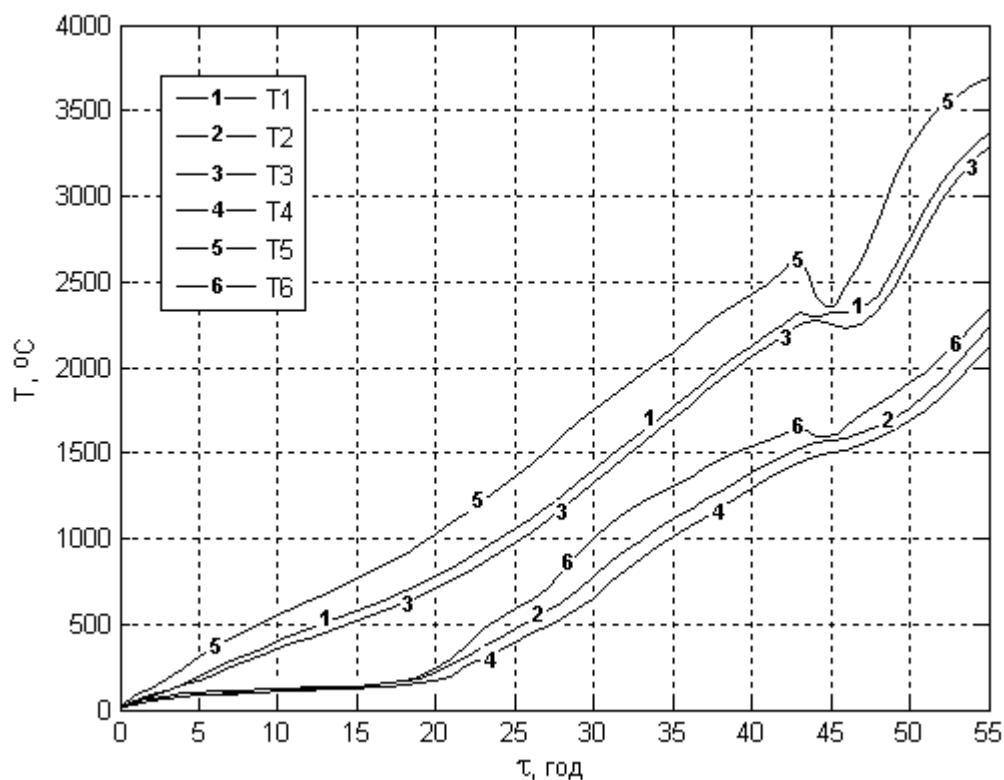


Рис. 4.22. Динаміка температури в заготовках середнього ряду

Результати моделювання для першої стадії кампанії (стадії розігріву) свідчать, що перепад температур в радіальному напрямку по осі y незначний і не може впливати на швидкість розігріву.

Для порівняльного аналізу перепадів температур в напрямках по осях x та z розрахуємо відносний перепад температур, який визначається, як: $\delta = \Delta T / l$, де l – відповідний лінійний розмір заготовки, см. Результати розрахунків представлено на рис. 4.23.

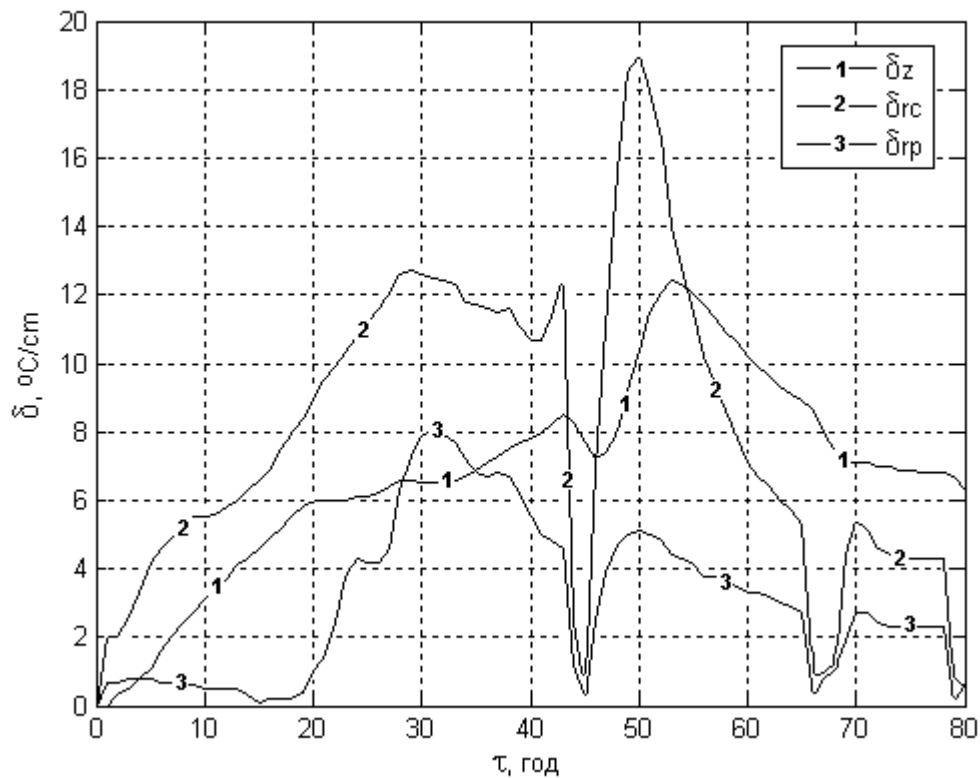


Рис. 4.23. Динаміка відносного перепаду температур в заготовках середнього ряду

Наведені дані показують, що радіальний перепад температур в центрі (індекс rc) заготовки істотно перевищує перепад температур на периферії (індекс rp) і є зіставним з осьовим (індекс z) перепадом температур.

Відомо [2, с. 61–70], що обпалені електродні заготовки утворені крихким матеріалом з відмінними механічними властивостями в паралельному (z) та перпендикулярному (r) осі пресування напрямках. Кінцева продукція (графітовані електроди) набуває деяку пластичність із збереженням ортотропного характеру механічних властивостей. Тому використання максимального перепаду температур як критерію керування стадією розігріву (п. 1.7.4) при близьких значеннях δ_{xc} та δ_z не може забезпечити оптимальність процесу навіть при експериментальному визначенні безпечних перепадів температур для кожного виду продукції, а в деяких випадках може призвести до руйнування електродних заготовок.

Необхідність використання в якості критерію керування максимального напруження у виробках (3.11) потребує створення моделі поля (3.5), що враховує анізотропію (часткового виду) властивостей матеріалу електродної заготовки.

4.3.2. Модель термопружного стану електродних заготовок.

Оскільки швидкість зміни переміщень значно перевищує швидкість зміни температури в суцільному середовищі, впливом прискорень можна знехтувати і розглядати динамічну задачу термопружності як послідовність рівноважних станів, розрахованих для кожного кроку навантаження печі [130].

Квазістаціонарна задача термопружності для просторової області Ω_3 , що представляє електродну заготовку середнього горизонтального ряду, описується такою системою рівнянь [131]:

Рівняння рівноваги

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \gamma g = 0; \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} = 0; \end{cases} \quad (4.35)$$

Співвідношення Коші

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; & \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right); \\ \epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; & \epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right); \\ \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; & \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right); \end{cases} \quad (4.36)$$

де $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – пришвидшення вільного падіння;

u_v – компоненти переміщення, м;

σ_v – нормальні компоненти напруження, Па;

σ_{vn} – дотичні компоненти напруження, Па;

ϵ_k – відносні лінійні подовження;

$2 \cdot \epsilon_{vn}$ – кутові деформації;

$v, n = x, y, z$.

В матричній формі узагальнений закон Гука може бути поданий так:

$$\boldsymbol{\epsilon} = (T - T_0) \mathbf{e} + \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma}, \quad (4.37)$$

де $\boldsymbol{\epsilon}$ – вектор малих деформацій;

$\mathbf{e}$ – вектор термічних подовжень;

$\boldsymbol{\sigma}$ – вектор напружень;

$\mathbf{C}^{-1}$ – зворотна матриця пружності.

Для ортотропного середовища заготовки наведені величини мають такий вигляд [2, 151]:

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_r & -\nu/E_r & -\nu/E_r & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E_r & 1/E_r & -\nu/E_r & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E_z & -\nu/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_r \\ e_r \\ e_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix},$$

де r – індекс радіального напрямку (по осям x та y);

e – коефіцієнти температурного розширення у відповідних напрямках, K^{-1} ;
 E – модулі Юнга у відповідних напрямках, Па;
 G – модулі зсуву у відповідних ортогональних площинах ($G_{yz} = G_{xz}$), Па;
 ν - коефіцієнт Пуассона.

Геометричні граничні умови задаються на поверхнях, утворених січними площинами xu та uz , як умови симетрії. Для обмеження переміщення по осі y обрана опорна точка у центрі ваги заготовки (точка 1 на рис. 4.21б).

$$\begin{cases} u_x|_{x=0} &= 0; \\ u_y|_{x_1, y_1, z_1} &= 0; \\ u_z|_{z=0} &= 0. \end{cases} \quad (4.38)$$

На всіх інших поверхнях задаються статичні граничні умови виду:

$$\sigma_j|_n = N_j, \quad (4.39)$$

де N – тиск на поверхню, Па.

Розв'язання задачі (4.35) .. (4.37) з граничними умовами (4.38) та (4.39) методом граничних елементів [132] для поточного температурного поля $T(x, y, z, \tau)$ дає поле напружень $\sigma(x, y, z, \tau)$ та переміщень $u(x, y, z, \tau)$ заготовки середнього ряду на кожному кроці навантаження.

4.3.3. Дослідження температурного розширення виробів.

Попередні спроби моделювання термопружного стану виробів під час кампанії графітації були надто загальними та обмеженими (п.р. 1.6) зокрема через дуже складний характер об'ємних перетворень (розширення та усадки) в матеріалі виробів (який є коксо-пековою композицією, п.р. 1.3).

Відомо [38], що коефіцієнт температурного розширення для електродних заготовок має лінійний характер тільки до температури попередньої обробки

(температура обпалювання заготовок 950..1100°C). Далі розширення уповільнюється через усадочні явища, що тривають до температури пропікання коксу (1250..1300°C). Після цього спостерігається різке розширення, пов'язане з десульфуризацією коксів (1300..2100°C). Максимальне розширення заготовок спостерігається при температурі 2100..2200°C, після чого починається усадка, пов'язана з утворенням кристалічної структури графіту. При температурі 3000°C графітовані заготовки набувають початкових розмірів (або навіть зменшують їх).

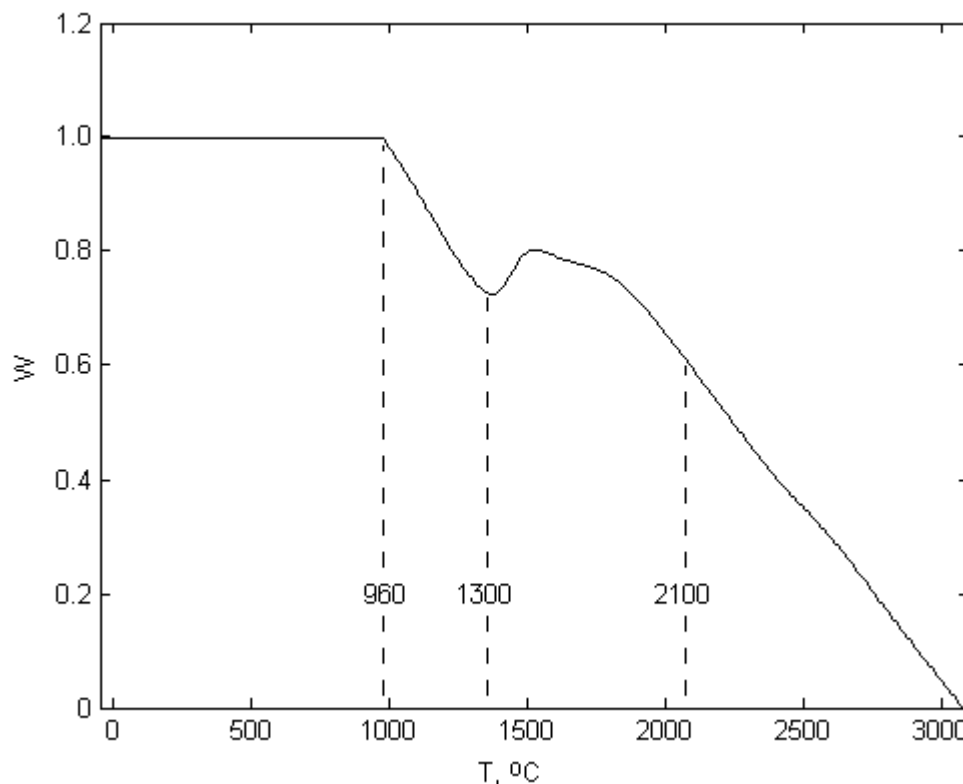


Рис. 4.24. Температурна залежність поправкового коефіцієнта температурного розширення

Для врахування описаних явищ при аналізі термопружного стану заготовок вектор $\mathbf{e}$ в (4.37) слід замінити на

$$\mathbf{e}_T = \mathbf{e} \cdot W(T), \quad (4.40)$$

де $W(T)$ – поправковий коефіцієнт.

Для заготовок з температурою обпалювання 960°C , що сформовані з використанням рядових коксів, поправочний коефіцієнт визначається згідно з графіком (рис. 4.24), побудованим за даними [133].

4.3.4. Числове моделювання поля термічних напружень.

На рис. 4.25 зображена розрахункова (із поправкою (4.40)) динаміка максимальних напружень в радіальному та осьовому напрямках електродних заготовок середнього ряду під час експериментальної кампанії з ординарним регламентом (для керуючого впливу $U_{e1}(\tau)$). В розрахунках використані механічні показники заготовок (модулі пружності), неведені в [2] та [115].

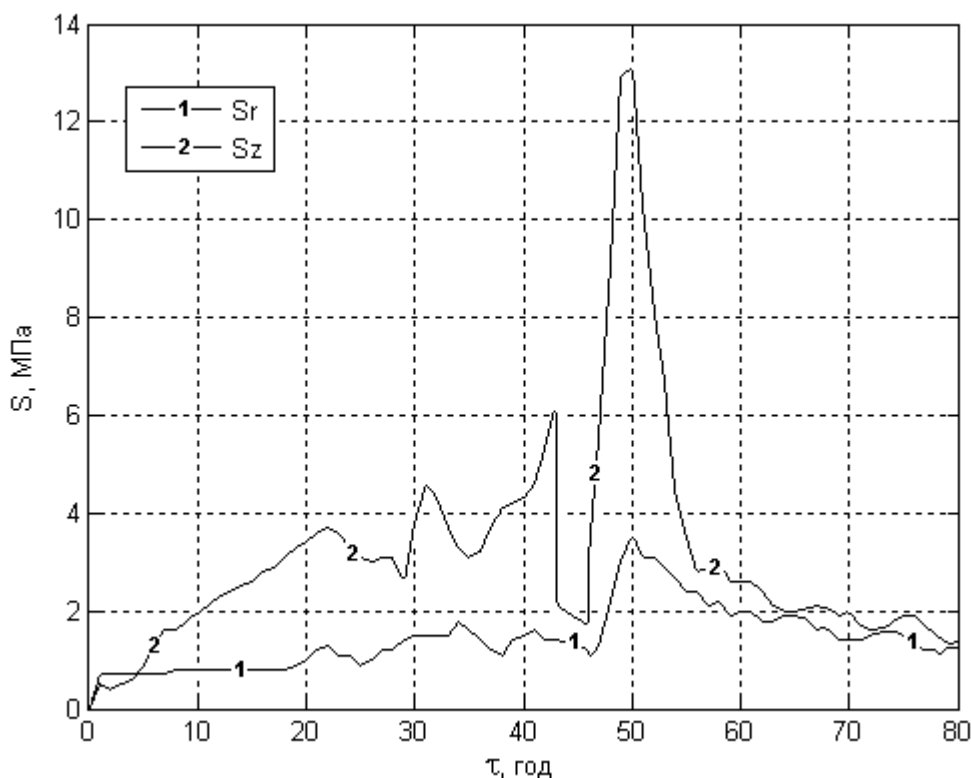


Рис. 4.25. Динаміка максимальних абсолютних напружень в заготовках середнього ряду

Отримані результати показують, що на стадії розігріву напруження в заготовках незначні (в порівнянні з граничними значеннями $\sigma_z^{\text{tens}} = 15.2$ МПа; $\sigma_r^{\text{tens}} = 7$ МПа), що свідчить про великий запас міцності та можливість істотної

інтенсифікації процесу графітації. Разом з тим, після тимчасового припинення підведення енергії на 44-й годині спостерігається кидок напруження (в осьовому напрямку він наближається до границі міцності). Це явище потенційно небезпечне при традиційному способі графітації і обов'язково повинно враховуватись при розробці алгоритмів керування в нештатних режимах.

Головні напруження можна визначити, як власні значення матриці, утвореної тензором напружень [134]:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

Порівняння розрахованих нормальних і головних напружень показує їх практичне співпадіння в радіальному напрямку (різниця не перевищує 2 %) та переважання нормальних напружень над головними (до 20 %) в радіальному напрямку, що гарантує коректність застосування критерію (3.11) для керування стадією розігріву.

4.4. Оцінювання ступеня графітації виробів

Для перевірки обмеження (3.10) необхідно визначити найменше поточне значення ступеня графітації в об'ємі виробів. Аналіз характеру динаміки температурного поля електродних заготовок (додаток Д) дозволяє стверджувати, що ступінь графітації буде найменшим в “найхолоднішому” місці виробів. Таким чином, для розв'язання задачі (3.12) замість розрахунку всього поля β за допомогою моделі (3.5) достатньо визначити ступінь графітації β в характеристичній точці, де цей показник буде найменшим [137, 138, 143]. При цьому характеристична точка і динаміка температури в ній визначаються при розв'язанні електротермічної задачі (п.р. 4.2).

4.4.1. Кінетична модель ізотермічної графітації.

Відомо, що залежність ступеня графітації від часу ізотермічної витримки описується залежністю [2]:

$$\beta = 1 - e^{-B(T_a)\tau}, \quad (4.41)$$

де β – ступінь графітації ($\beta = 1$ – відповідає цілковитій графітації);

τ – час графітації, год;

T_r – температура ізотермічної графітації в характеристичній точці, К;

B – стала швидкості графітації, 1/год, яка залежить від температури та структури матеріалу, що графітується.

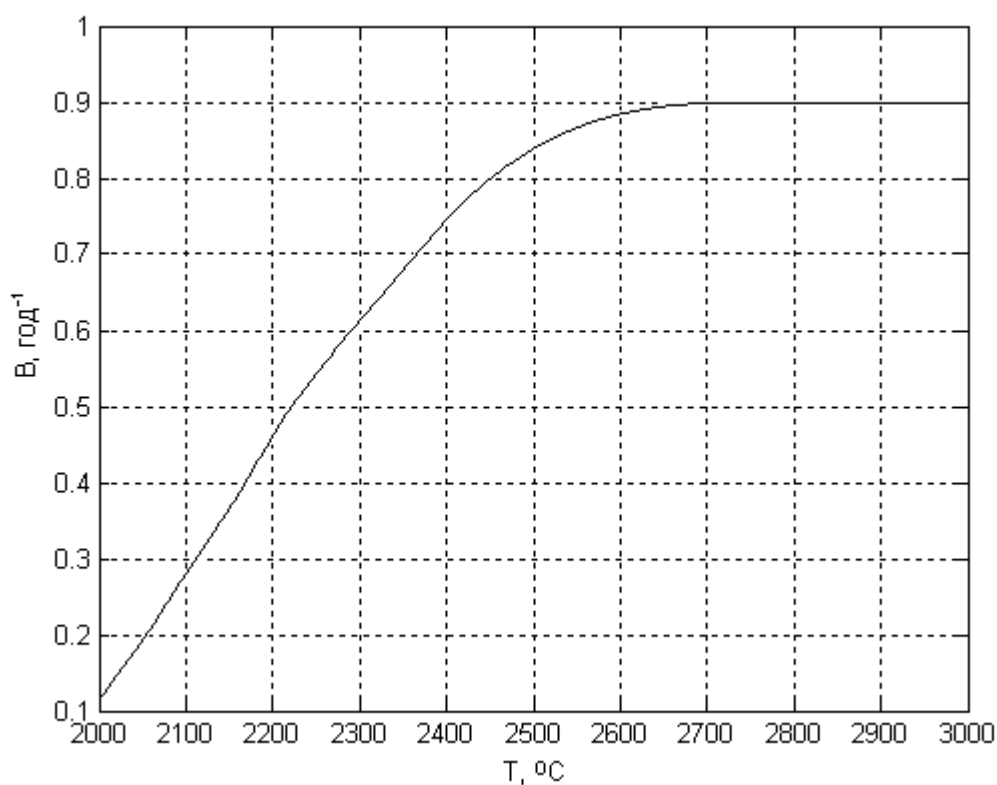


Рис. 4.26. Температурна залежність сталої швидкості графітації нафтового коксу

Визначена за даними [2] температурна залежність кінетичного параметра B для нафтового коксу (який є основним компонентом електродних заготовок)

показує, що стала швидкості набуває максимального значення при 3000 К (рис. 4.26). На рис. 4.27 зображено динаміку ступеня ізотермічної графітації, отриману відповідно до (4.41) для різних значень температури графітації.

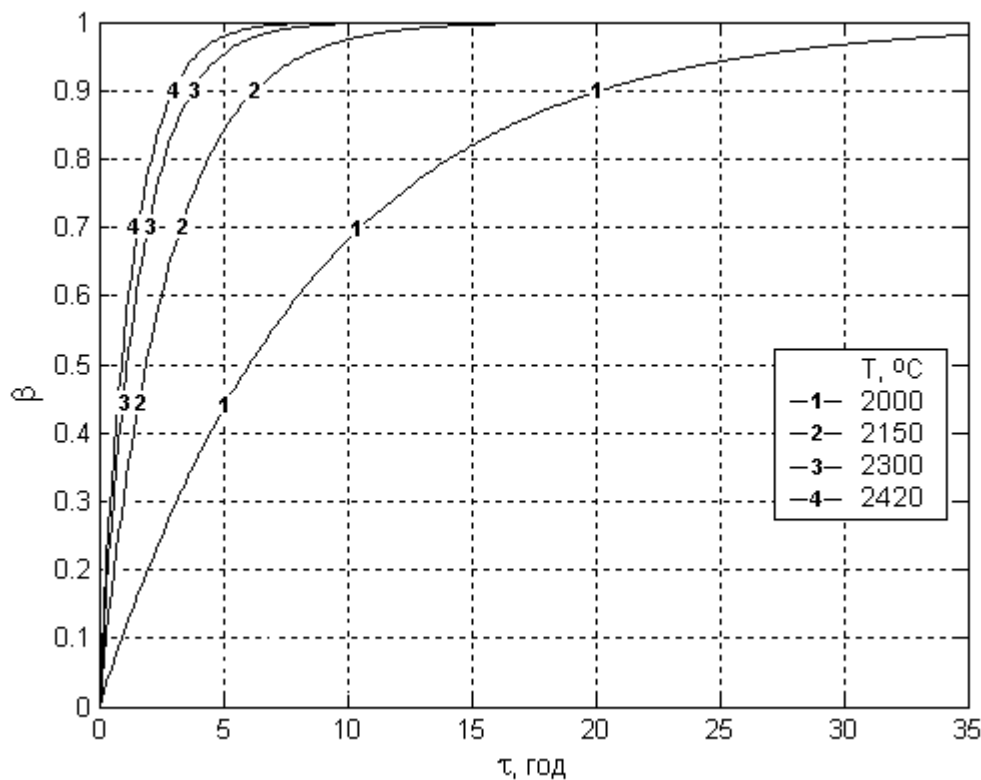


Рис. 4.27. Динаміка ступеня ізотермічної графітації
для різних значень температури графітації

4.4.2. Визначення достатнього ступеня графітації.

Аналіз великого обсягу літературних джерел (п.р. 1.2) показує, що жодне з них не надає обґрунтованих рекомендації щодо ступеня графітації, який можна вважати достатнім для отримання бажаної якості кінцевої продукції.

Використовуючи усталені частини залежностей (4.41) отримаємо залежності часу ізотермічної витримки τ_r , необхідного для досягнення заданого ступеня графітації виробу, від температури графітації T_r . При побудові залежності враховано той факт, що графітація при 3000 °C відбувається практично миттєво [2].

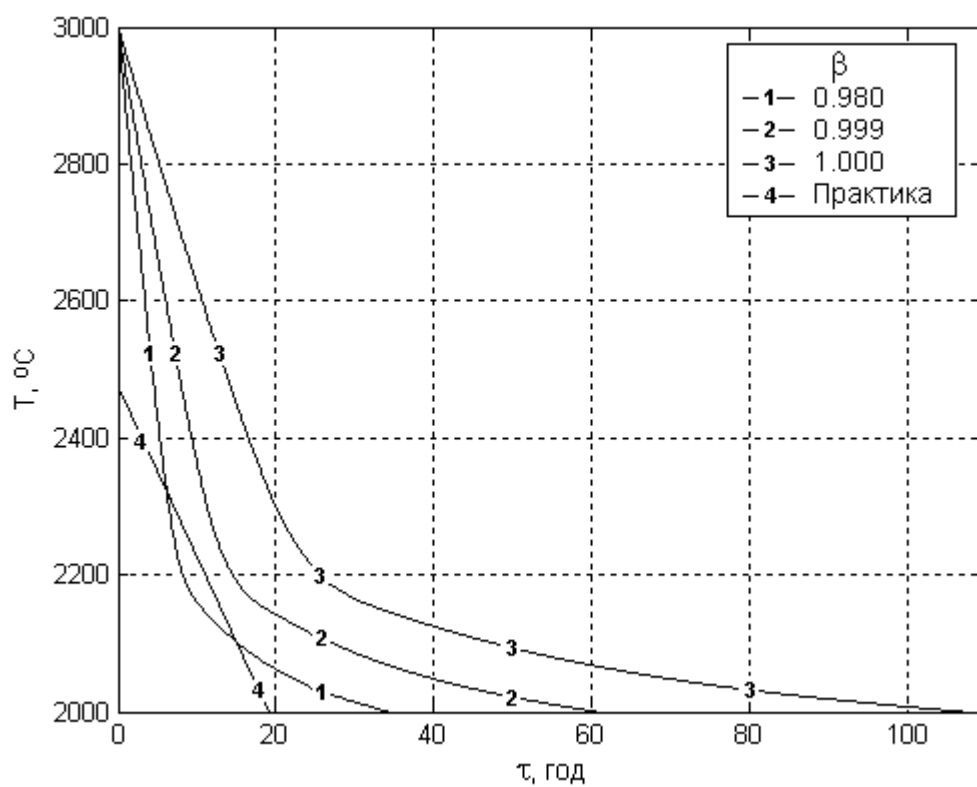


Рис. 4.28. Лінії рівних значень ступеня графітації в просторі параметрів час – температура графітації

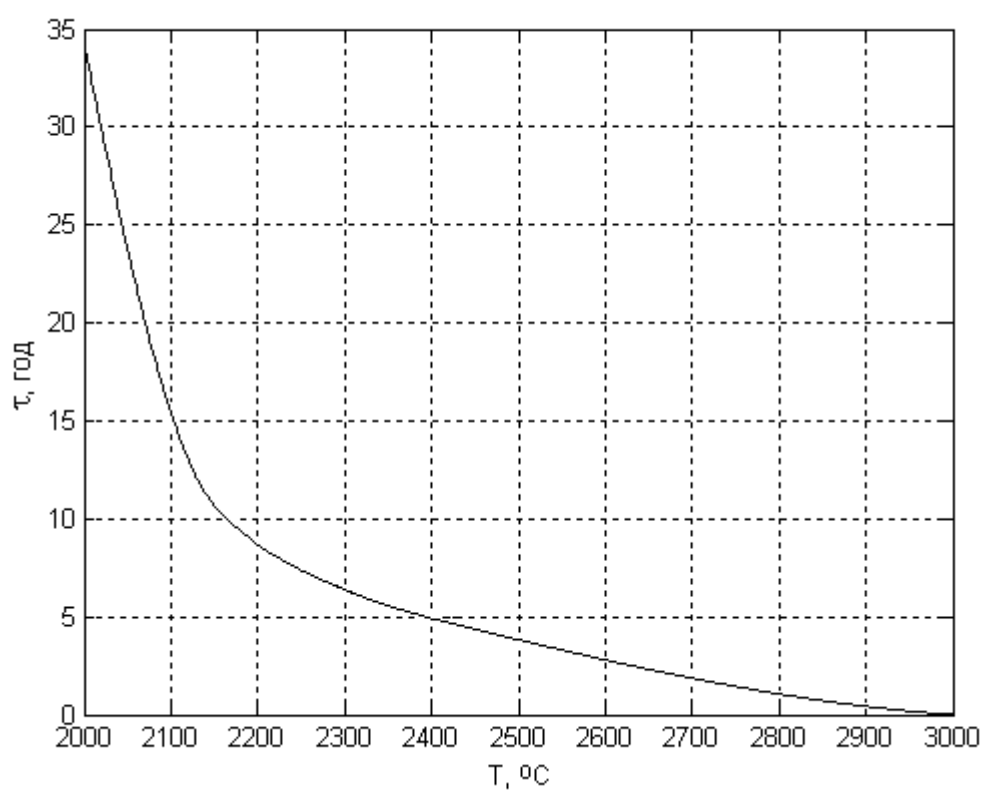


Рис. 4.29. Температурна залежність часу графітації нафтового коксу для $\beta_{\text{set}} = 0.98$

Як видно з рис. 4.28, для отримання 100-відсоткової графітації периферії виробів в сенсі моделі (4.41), кампанію довелось би подовжити на десятки годин, що абсолютно неприйнятно з економічної точки зору.

Порівняємо отримані результати з емпіричною залежністю (рис. 4.28, лінія 4), яку використовують в промислових умовах для оцінювання стану виробів.

Як видно з рисунку, емпірична залежність приблизно відповідає ступеню графітації 98 %. Тобто на основі тривалої практики можна стверджувати, що в промислових умовах 98-відсоткову графітацію периферії заготовок можна вважати достатньою для отримання продукції задовільної якості.

Подібну до отриманої (рис. 4.29) температурну залежність тривалості графітації для інших вуглецевих матеріалів можна визначити експериментально на установках безперервної графітації [3]:

$$\begin{cases} \tau_r = f(T_r); \\ 2000 < T_r \leq 3000. \end{cases} \quad (4.42)$$

Залежності виду (4.42), при наявності інформації про динаміку температури в характеристичній точці виробів, у відповідності з критерієм (3.12) можна використовувати для визначення тривалості кампанії графітації.

4.4.3. Спрощена форма моделі.

Відомо, що графітація відбувається при температурах, що перевищують 2000 °C [2]. Розглянемо детальніше цей температурний діапазон [137].

На рис. 4.30 лінія 1 характеризує динаміку температури характеристичної точки електродних виробів $T(\tau)$ в типовій кампанії графітації з ординарним регламентом (зображено фрагмент, що відповідає температурному діапазону графітації). Апроксимуємо цю характеристику лінією, що містить тільки ізотермічні ділянки T_i (рис. 4.30, лінія 2).

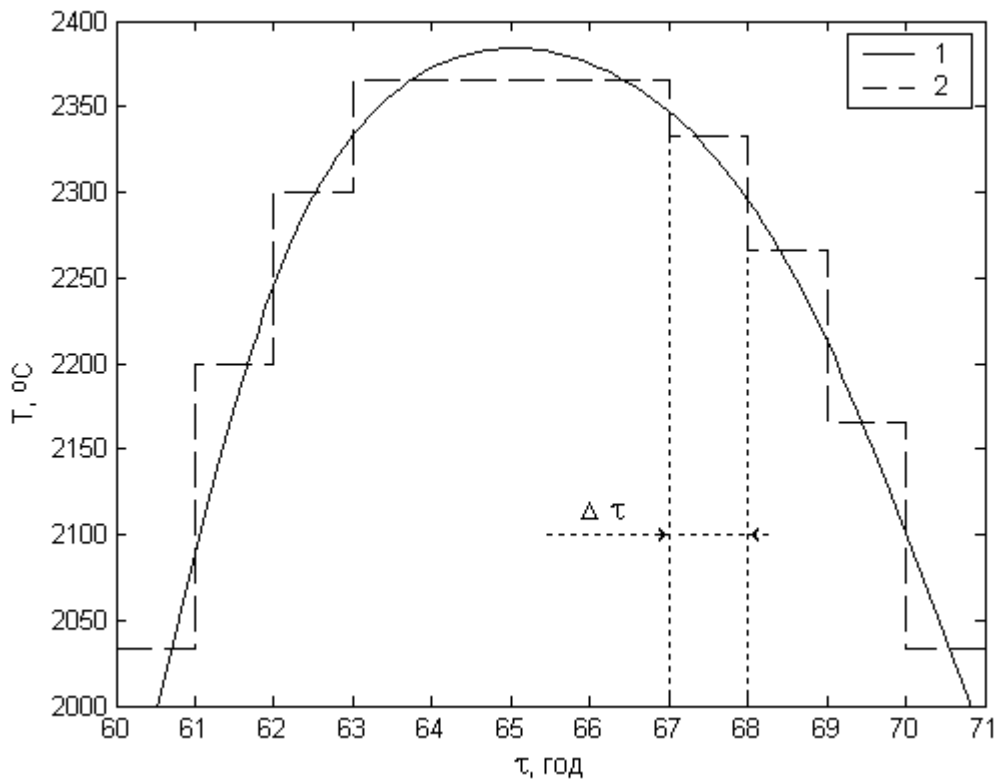


Рис. 4.30. Динаміка температури характеристичної точки виробів

Для спрощення вважатимемо, що графітація має лінійний характер на кожній окремій ділянці. Тоді ступінь графітації β_i , який отримає виріб в характеристичній точці на i -ій ділянці характеристики можна приблизно визначити як:

$$\beta_i = \frac{\Delta \tau_i}{\tau_{ai}}$$

де $\Delta \tau_i$ – тривалість i -ї ділянки ізотермічної графітації;

τ_i – час, необхідний для досягнення виробом заданого ступеня графітації при температурі T_i ізотермічної графітації. Час τ_i можна визначити відповідно до (4.42). Тоді ступінь графітації $\hat{\beta}$, який отримує виріб в характеристичній точці за всю кампанію відповідно до апроксимуючої характеристики визначається як:

$$\hat{\beta} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tau_i}{f(T_i)},$$

де n – кількість ізотермічних ділянок.

Спрямовуючи $\Delta \tau_i$ до нуля, оціночне значення ступеня графітації β вироб в характеристичній точці за кампанію графітації можна визначити як:

$$\beta = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{d\tau}{f(T(\tau))}, \quad (4.43)$$

де $\tau_1 \div \tau_2$ – часовий інтервал, в якому температура характеристичної точки виробів $T(\tau)$ перевищує 2000°C ;

f – функція, що визначається відповідно до (4.42).

Таким чином, момент закінчення кампанії графітації (момент припинення підведення потужності до печі) можна визначити з умови: $\beta \geq \beta_{\text{set}}$, розв'язуючи (4.43) в рекурентній формі (наприклад, за складовою формулою Гауса нульового порядку [135, с. 203]):

$$\begin{cases} \beta_k = \beta_{k-1} + \frac{\psi}{f(T(\psi_k))}; \\ \psi_k = \tau_1 + \psi \cdot (0.5 + k); \\ \beta_0 = 0; \quad k = 1; \quad \frac{\tau_2 - \tau_1}{\psi}, \end{cases} \quad (4.44)$$

де β_k – значення ступеня графітації на k -му кроці;

ψ – крок розрахунків за часом.

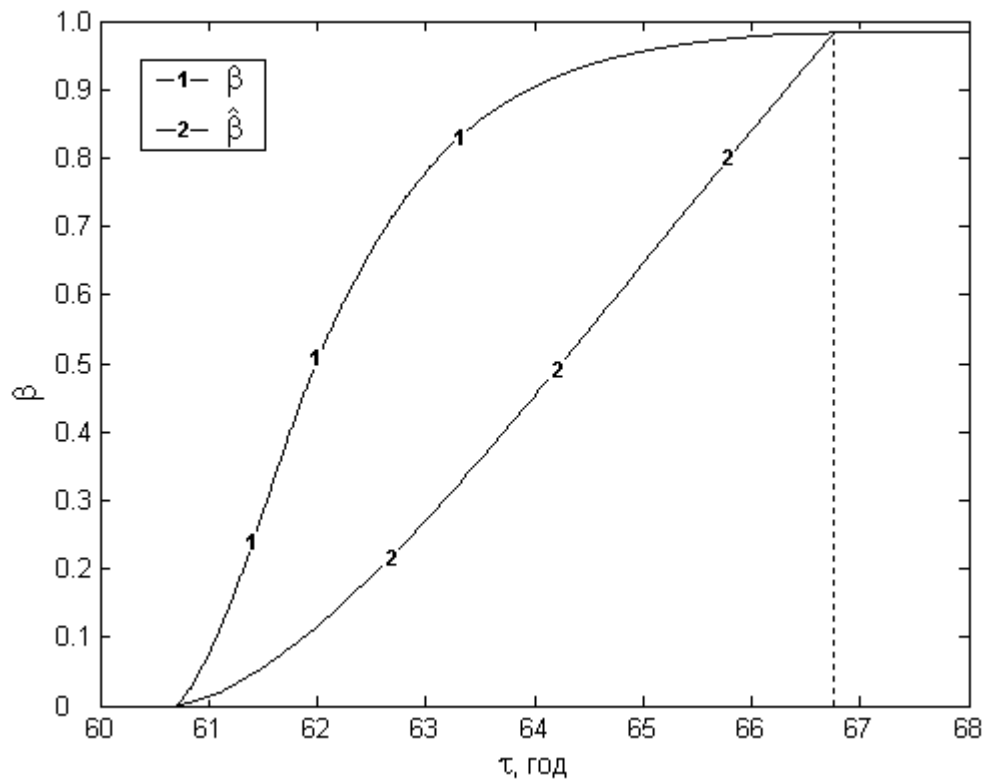


Рис. 4.31. Динаміка ступеня графітації виробу в характеристичній точці

На рис. 4.31, крива 1 зображено дійсну динаміку ступеня графітації виробу в характеристичній точці при розглянутому температурному режимі (рис. 4.30, крива 1), розраховану відповідно до кінетичної залежності (4.41). Для перевірки адекватності метода на рис. 4.31, крива 2 зображено оціночну динаміку ступеня графітації, розраховану відповідно до (4.44) при тому ж температурному режимі.

Порівняльний аналіз показує, що криві співпадають при досягненні характеристичною точкою заданого ступеня графітації $\beta = \beta_{\text{set}}$, а, отже, метод дозволяє визначити момент досягнення виробом заданого ступеня графітації з достатньо високою точністю.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Розроблено модель електричного поля керна печі графітації постійного струму. На основі числового експерименту з'ясовано характер розподілення потенціального поля в просторі керна. За результатами вимірювання електричних показників компанії з ординарним регламентом підведення потужності визначено електричний ККД печі, на якій здійснювались експериментальні дослідження процесу графітації.

2. Розроблено спрощену модель електричного поля керна печі графітації для заготовок діаметром 555 мм при традиційній схемі пакетування. Модель може використовуватись для оцінювання розподілу джоулевої теплоти в області керованої пересипки.

3. Розроблено швидку адаптивну модель температурного поля, що враховує витрати енергії на випаровування вологи та дозволяє при внутрішніх збуреннях адекватно оцінювати температурний стан печі графітації впродовж всієї кампанії. На основі числового експерименту досліджено теплові процеси в керні печі графітації та процеси теплообміну на зовнішніх границях печі. Визначено, що зовнішні збурення не чинять істотного впливу на температурний стан керна і не потребують додаткових заходів для їх компенсації.

4. Розроблено модель термопружного стану виробів, що враховує особливості термічного розширення електродних заготовок у всьому температурному діапазоні графітації. Визначено просторову область, термопружний стан якої зумовлює швидкість розігріву керна печі графітації. На основі аналізу термопружного стану виробів зроблено висновок про існування значного резерву інтенсифікації процесу графітації при існуючих регламентах підведення потужності.

5. Обґрунтовано можливість заміни використання моделі розподіленого поля ступеня графітації оцінкою цього показника тільки в характеристичній точці виробів. Визначено, що в промислових умовах 98-відсоткову графітацію

периферії заготовок можна вважати достатньою для отримання продукції задовільної якості.

6. Розроблено простий метод визначення часу припинення підведення енергії до печі графітації (тривалості кампанії графітації) шляхом оцінювання ступеня графітації готової продукції. Метод можна використовувати в системі керування процесом графітації в поєднанні з моделлю температурного поля керна або автономно шляхом прямого вимірювання температури в характеристичній точці виробів.

5. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТАЦІЇ В ПЕЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Метою створення системи автоматизованого керування процесом графітації в печі Ачесона є мінімізація енерговитрат при забезпеченні стабільної якості кінцевої продукції. Для розв'язання поставленої задачі (п.р. 3.2), система керування, що розробляється, повинна мати дворівневу структуру (рис. 3.2). Причому в якості системи керування нижнього рівня планується використовувати існуючу автоматизовану систему (п.р. 1.8), яка повинна виконувати всі традиційні функції і (за необхідності) працювати в автономному режимі.

Визначення субоптимальних в сенсі критерію (3.1) стратегій покладено на систему керування верхнього рівня, яка розв'язує часткові задачі, утворені декомпозицією задачі керування, для двох стадій кампанії (першої стадії – розігріву, та другої – графітації) у відповідності з алгоритмами керування.

5.1. Керування стадією розігріву

Перша стадія кампанії (стадія розігріву) характеризується можливістю змінювати швидкість розігріву в широкому діапазоні (п.р. 2.5), тобто керування за каналом $U \rightarrow T$ (а, отже, і за каналом $U \rightarrow \sigma$) дозволяє отримати будь-який термopужний стан виробів з множини припустимих значень (3.9).

5.1.1. Критерій керування стадією розігріву.

Виходячи із загальних уявлень про динаміку температурного поля заготовок середнього ряду та ортотропний характер механічних властивостей матеріалу виробів (п. 4.3.1) критерій керування першою стадією (3.11) доцільно сформулювати в такому вигляді [141]:

$$\begin{cases} s_r(\tau) = \sigma_r^{\text{tens}} - \xi; \\ \text{or} \\ s_z(\tau) = \sigma_z^{\text{tens}} - \xi; \end{cases} \quad (5.1)$$

де s_r, s_z – відповідно максимальні абсолютні радіальні та осьові напруження в заготовках на кожному кроці навантаження, Па;

ξ – задана точність визначення напружень в заготовках, Па, враховує похибку моделі та зміни температури впродовж кроку навантаження;

$\sigma_z^{\text{tens}}, \sigma_r^{\text{tens}}$ – границі міцності на розтягнення матеріалу в осьовому та радіальному напрямках відповідно, Па, які легко визначити в лабораторних умовах для кожної партії обпалених електродних заготовок.

Розв’язання задачі (3.13) на основі критерію (5.1) забезпечує максимальну швидкість підведення потужності до печі графітації при забезпеченні цілісності електродних виробів, якщо на кожному кроці навантаження відоме поле напружень заготовок середнього горизонтального ряду.

5.1.2. Алгоритм керування стадією розігріву.

Представимо безперервний час кампанії графітації, як послідовність кроків навантаження: $\tau = \psi \cdot k$, де ψ – тривалість кроку, год; k – номер кроку. Тоді, у відповідності з методом покрокової корекції (п.р. 3.3), на кожному кроці величину керуючого впливу $U(k)$ вважатимемо сталою, а її оптимальне (в сенсі критерію (5.1)) значення на стадії розігріву може бути визначено з наступної процедури (структурну схему алгоритму зображено на рис. 5.1) [149]:

1. При вмиканні печі графітації (селектори $s1$ та $s2$ на рис. 3.2) задаються початкові умови термічної задачі $\mathbf{T}(x, y, z, 0)$, початкове наближення параметрів електро-термічної моделі $\mathbf{A}(0)$ (блок 1) та максимальне для даної енергетичної установки значення напруги $U(0) = U_{\text{max}}$ (блок 2).

2. Встановлюється номер чергового кроку k (блок 3) і на піч подається керування $U(k)$ (блок 4). Вимірюються поточні (індекс a) значення змінних об’єкта $I_a(k)$ та $U_a(k)$ та записуються в базу даних (блоки 6 та 7).

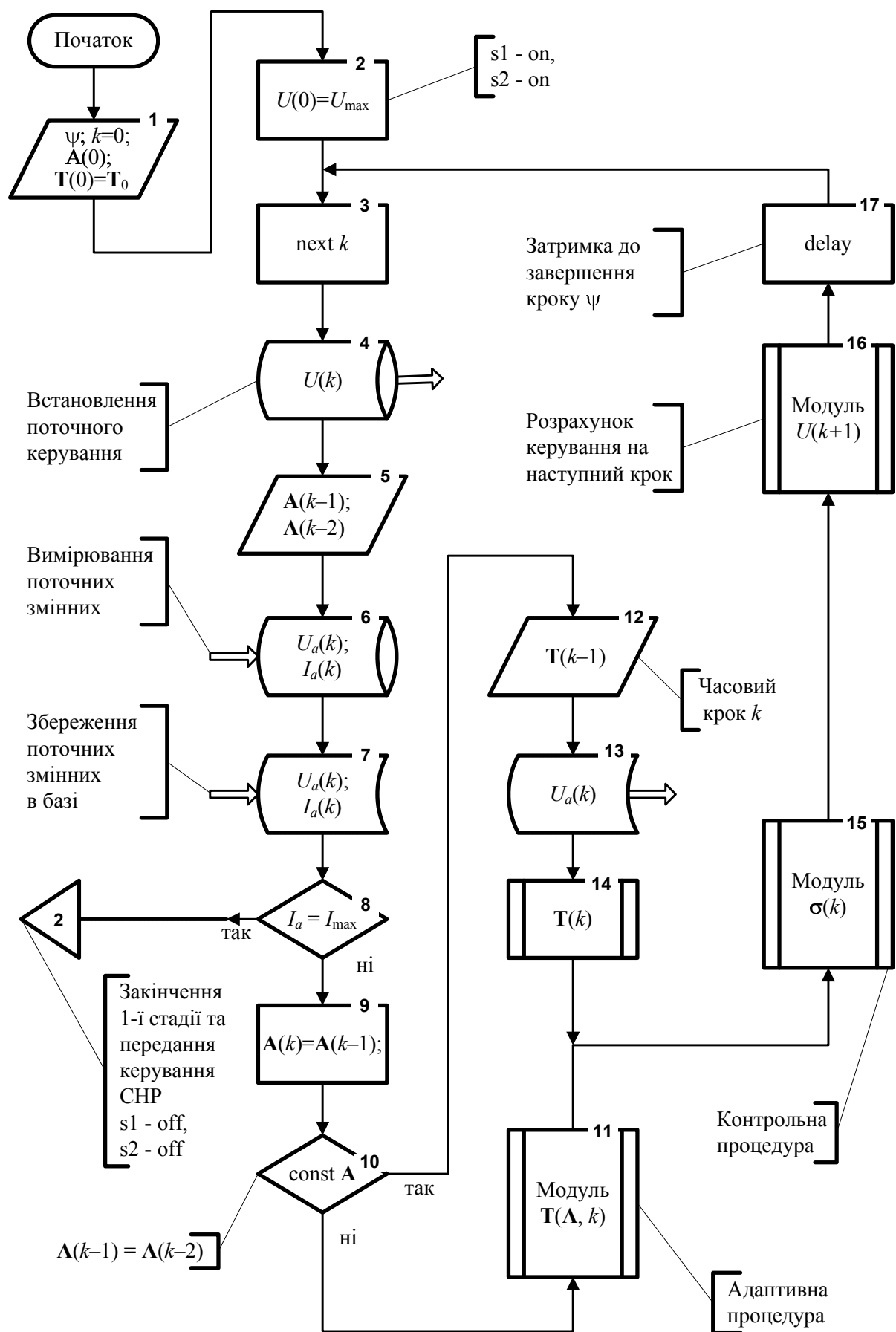


Рис. 5.1. Структурна схема алгоритму керування стадією розігріву

3. Здійснюється перевірка умови (3.14) (блок 8). Дотримання умови свідчить про завершення стадії розігріву печі. В цьому випадку керування піччю передається системі керування нижнього рівня (селектори s_1 та s_2), яка розв'язує задачу (3.14) традиційними засобами. В іншому випадку виконується наступний (4-й) пункт.

4. За значенням поточного керування $U_a(k)$ (блок 13) та останньому наближенню параметрів $A(k)$ (блок 9) за допомогою моделі (4.1) .. (4.8), (4.18) .. (4.30) оцінюється температурний стан печі $T(k)$ (блок 11 або 14) та за допомогою моделі (4.35) .. (4.39) оцінюється термopужний стан заготовок середнього ряду $\sigma(k)$ (блок 13) на момент закінчення поточного кроку навантаження.

5. На основі оцінок стану об'єкта на момент закінчення поточного кроку навантаження відповідно до (3.13) визначається керування на наступний крок (блок 16) і після часової затримки (блок 17), що узгоджує модельний час з реальним, процедура повторюється з пункта 2.

Розрахунок температурного поля печі здійснюється на основі поточних оцінок параметрів $A(k)$, отриманих в модулі адаптації (блок 11), що дозволяє корегувати модель на кожному кроці в бік компенсації похибки, викликаной неповною інформацією про властивості об'єкта.

Модуль адаптації є основним споживачем ресурсу системи керування верхнього рівня, причому в силу особливості критерію адаптації (4.31), обсяг розрахунків з часом зростає в геометричній прогресії, оскільки на кожному кроці здійснюється кількоразовий перерахунок динаміки температурного поля з початку кампанії, тобто з початковими умовами $T(0)$. Такий спосіб адаптації (п. 4.2.4.) може призвести до ситуації, коли час оцінювання стану об'єкта перевищить тривалість кроку навантаження ψ і система буде неспроможною розв'язувати задачу (3.13).

Для зменшення обсягу розрахунків в алгоритмі передбачена перевірка доцільності завершення процедури адаптації (блок 10), для чого на кожному кроці k порівнюються попередні оцінки параметрів $A(k - 1)$ та $A(k - 2)$, завантажені блоком 5. Після завершення адаптації (усталення A із заданою точністю)

температурне поле об'єкта розраховується тільки для поточного кроку з початковими умовами $\mathbf{T}(k-1)$ (блок 12).

5.1.3. Алгоритм адаптивної процедури.

Адаптивна процедура (блок 11 на рис. 5.1) реалізує пошук (4.31) на основі зворотного зв'язку у вигляді масиву виміřeníх вихідних змінних об'єкта $I_a(n)$, де $n = \overline{1; k}$ – номер кроку навантаження в прискореному масштабі часу, тобто $\tau_a = \psi \cdot n$. Структурна схема алгоритму процедури зображена рис. 5.2.

1. Реальний крок навантаження k починається завданням початкових умов $\mathbf{T}(x, y, z, 0)$ електротермічної задачі (блок 1).

2. Кожен крок n в прискореному масштабі часу включає завдання початкових умов, що відповідають температурному стану об'єкта на попередньому кроці (блок 2), завантаження вимірювань з бази даних, що відповідають поточному кроку (блок 3) та визначення температурного поля $\mathbf{T}(n)$ (блок 4) і модельного струму печі $I_m(n)$ (блок 5). Розрахунок інтегрального показника якості наближення оцінок $Y(n)$ (блок 6) потребує k ітерацій (блоки 7, 8).

$$Y_2(k) = \sum_{n=1}^k [I_a(n) - I_m(\mathbf{A}, n)]^2.$$

3. Двовимірний пошук вектора (4.32) на основі методу найшвидшого спуску (var2), потребує 5 .. 6 ітерацій в прискореному масштабі часу для кожного реального кроку навантаження k (блоки 9, 12 та 13). На рис. 4.2 вектор параметрів (4.32) подано, як

$$\mathbf{A}(k) = [v_1(k) \quad v_2(k)]^T, \quad (5.2)$$

де $v_1 = v_{nc}$ – середній масовий вологовміст зернової пересипки;

$v_2 = v_{ti}$ – середній масовий вологовміст теплоізоляційної шихти.

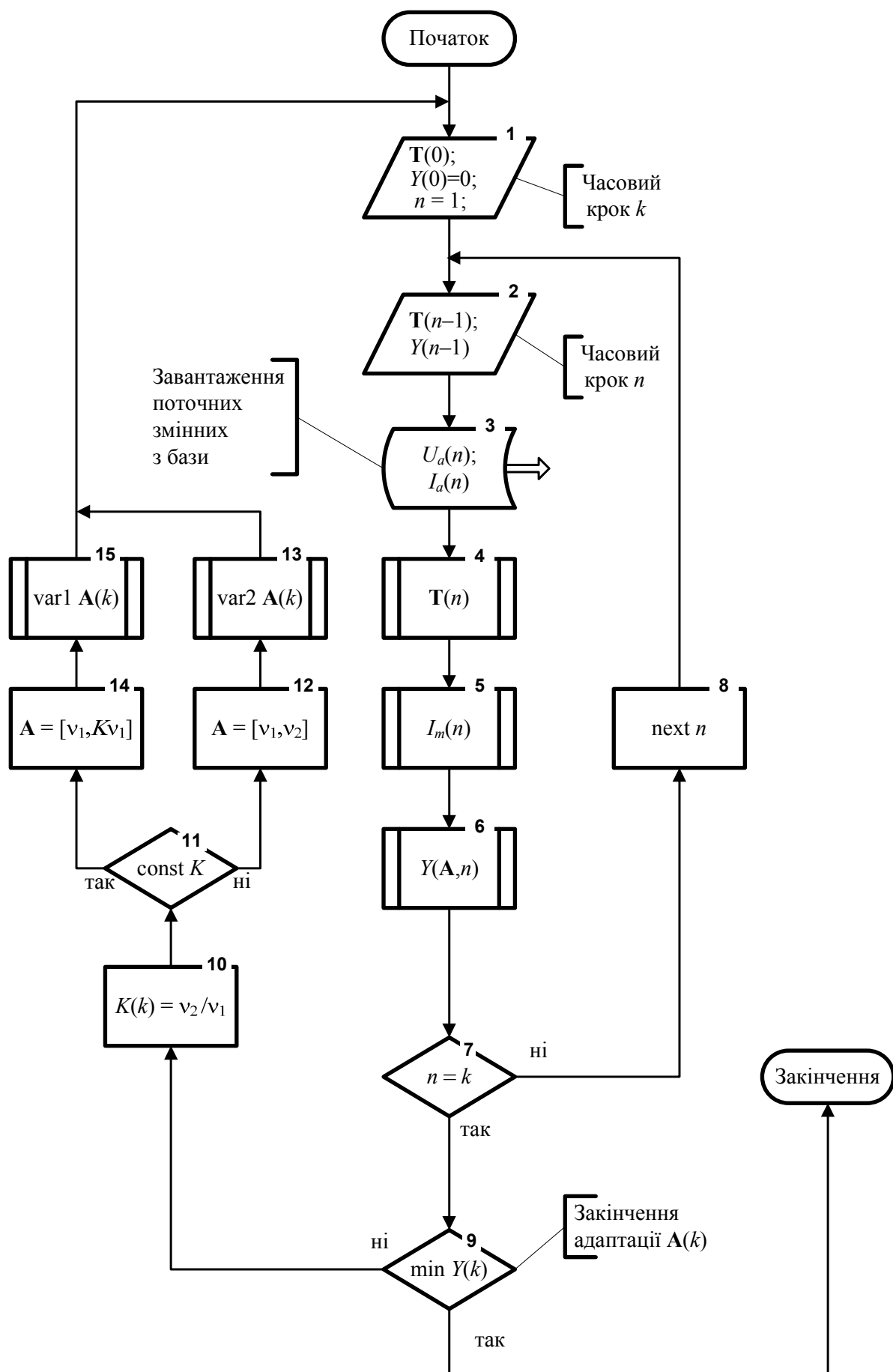


Рис. 5.2. Структурна схема алгоритму адаптації параметрів моделі на k -му кроці

Для зменшення обсягу розрахунків вектор параметрів (5.2) представимо у вигляді:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(k) = [\mathbf{v}_1(k) & \mathbf{v}_2(k)]^T; \\ \mathbf{v}_2(k) = K(k) \cdot \mathbf{v}_1(k); \end{cases}$$

де K – масштабний коефіцієнт (блок 10).

Тоді після усталення коефіцієнта $K(k)$ (блок 11), яке відбувається при невеликому значенні k , подальший пошук параметрів можна здійснювати, як одновимірний (var1) на основі методу виключення інтервалу [129], що потребує 2..3 ітерацій в прискореному масштабі часу для кожного реального кроку навантаження (блоки 14, 15).

5.1.4. Алгоритм визначення субоптимального керування.

Модуль 16 на рис. 5.1 реалізує процедуру розрахунку стратегії керування на наступний крок навантаження на основі критерію (5.1). Структурна схема алгоритму процедури зображена рис. 5.3.

1. Процедура розраховує оцінку температурного стану печі $\mathbf{T}(k+1)$ на наступний крок навантаження (блок 2) на основі поточного керування (блок 1), та оцінку термopружного стану заготовок середнього ряду $\boldsymbol{\sigma}(k+1)$ (блок 3). Згідно з (3.11) розраховуються максимальні абсолютні напруження в радіальному $s_r(k+1)$ та осьовому $s_z(k+1)$ напрямках заготовки середнього ряду (блок 4).

2. Здійснюється перевірка умови (блок 5):

$$\begin{cases} s_r(k+1) < \sigma_r^{\text{tens}} - \xi; \\ \text{and} \\ s_z(k+1) < \sigma_z^{\text{tens}} - \xi. \end{cases}$$

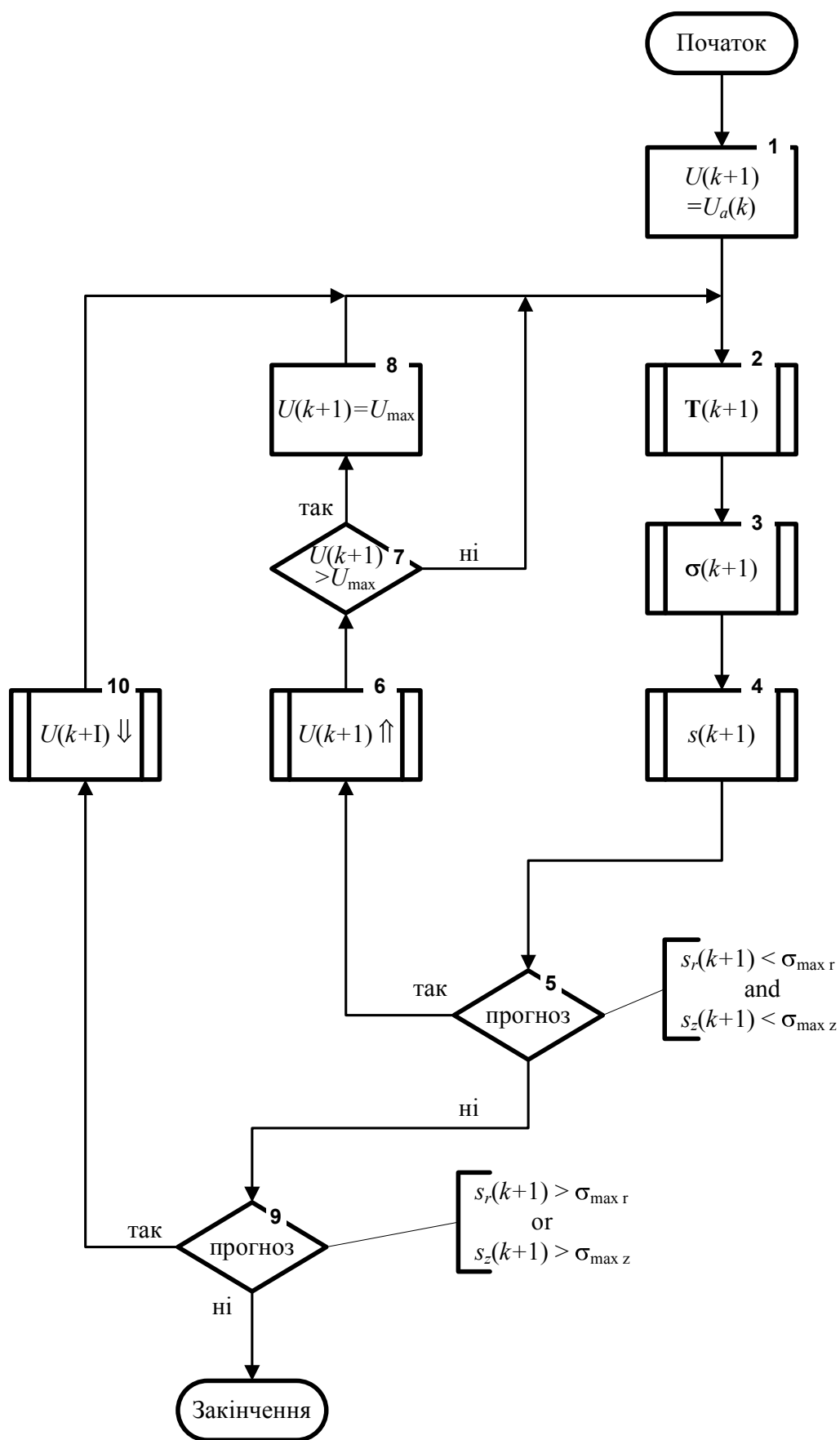


Рис. 5.3. Структурна схема алгоритму визначення керування на наступний крок

При дотриманні умови здійснюється збільшення значення керування $U(k+1)$ (блок 6), яке має верхнє обмеження на рівні $U_{\max}$ (блоки 7, 8), та повторюється розрахунок оцінок стану об'єкту при новому значенні керування (пункт 1). В іншому випадку виконується пункт 3 (наступний).

3. Здійснюється перевірка умови (блок 9):

$$\begin{cases} s_r(k+1) > \sigma_r^{\text{tens}} - \xi; \\ \text{or} \\ s_z(k+1) > \sigma_z^{\text{tens}} - \xi; \end{cases} \quad (5.3)$$

при дотриманні умови здійснюється зменшення значення керування $U(k+1)$ (пункт 10), яке має нижнє обмеження на рівні 0 В, та повторюється розрахунок оцінок стану об'єкту при новому значенні керування (пункт 1). В іншому випадку процедура закінчується.

Завершення процедури свідчить про дотримання умов критерію (5.1) із точністю ξ .

Зміна значення керування в пунктах 2 та 3 (блоки 6 та 10) відбувається за схемою одного з методів послідовної одновимірної оптимізації [129].

5.2. Керування стадією графітації

Керування підведенням потужності на другій стадії здійснює система нижнього рівня (пункт 3, п. 5.1.2). Відповідно до п.р. 3.2. основною задачею системи керування верхнього рівня на другій стадії є визначення часу завершення кампанії графітації.

Згідно з п.р. 4.4 для розв'язання поставленої задачі можна обмежитись визначенням ступеня графітації β в „найхолоднішій” точці заготовок (характеристичній точці керна), яка визначається шляхом аналізу температурного поля виробів (в печі, що розглядається, характеристична точка керна розташована на периферії заготовок верхнього горизонтального ряду, див. рис. 4.15 та 4.17).

5.2.1. Алгоритм керування стадією графітації.

Задачу (3.12) при спрощеному підході для дискретного часу $\tau = \psi \cdot k$ можна сформулювати наступним чином [152]:

$$\begin{cases} \beta \geq \beta_{\text{set}}; \\ T(k) \geq 2000; \end{cases} \quad (5.4)$$

де T – температура в характеристичній точці на k -му кроці навантаження, °C.

$\beta_{\text{set}} = 0.98$ – заданий ступінь графітації (п. 4.4.2.).

Блок-схема алгоритму зображена рис. 6.4.

1. При переході до другої стадії (селектори $s1$ та $s2$ на рис. 3.2) задаються початкові умови термічної задачі $\mathbf{T}(k-1)$ (блок 4) і розраховується оцінка температурного поля $\mathbf{T}(k)$ на момент закінчення поточного кроку (блок 6) на основі ідентифікованих раніше параметрів моделі $\mathbf{A}(k)$ (блок 3) та поточного керування $U_a(k)$ (блок 5), значення якого завантажено з бази даних. Визначається оцінка температури в характеристичній точці $T_{\min}(k)$ (блок 9).

2. Якщо температура в характеристичній точці не досягла діапазону графітації (блок 10), ступінь графітації в ній вважається нульовим (блок 11) і це значення завантажується в базу даних (блок 12), після чого здійснюється узгодження модельного часу з реальним (блок 13). В іншому випадку виконується наступний пункт.

3. Якщо в характеристичній точці відбувається графітація, її ступінь визначається відповідно до (4.44) та зберігається в базі даних (блок 15). При цьому поточне значення ступеня графітації формується на основі оцінок, отриманих на попередніх кроках та збережених в базі даних:

$$\beta(k) = \sum_{j=1}^k \beta(j). \quad (5.5)$$

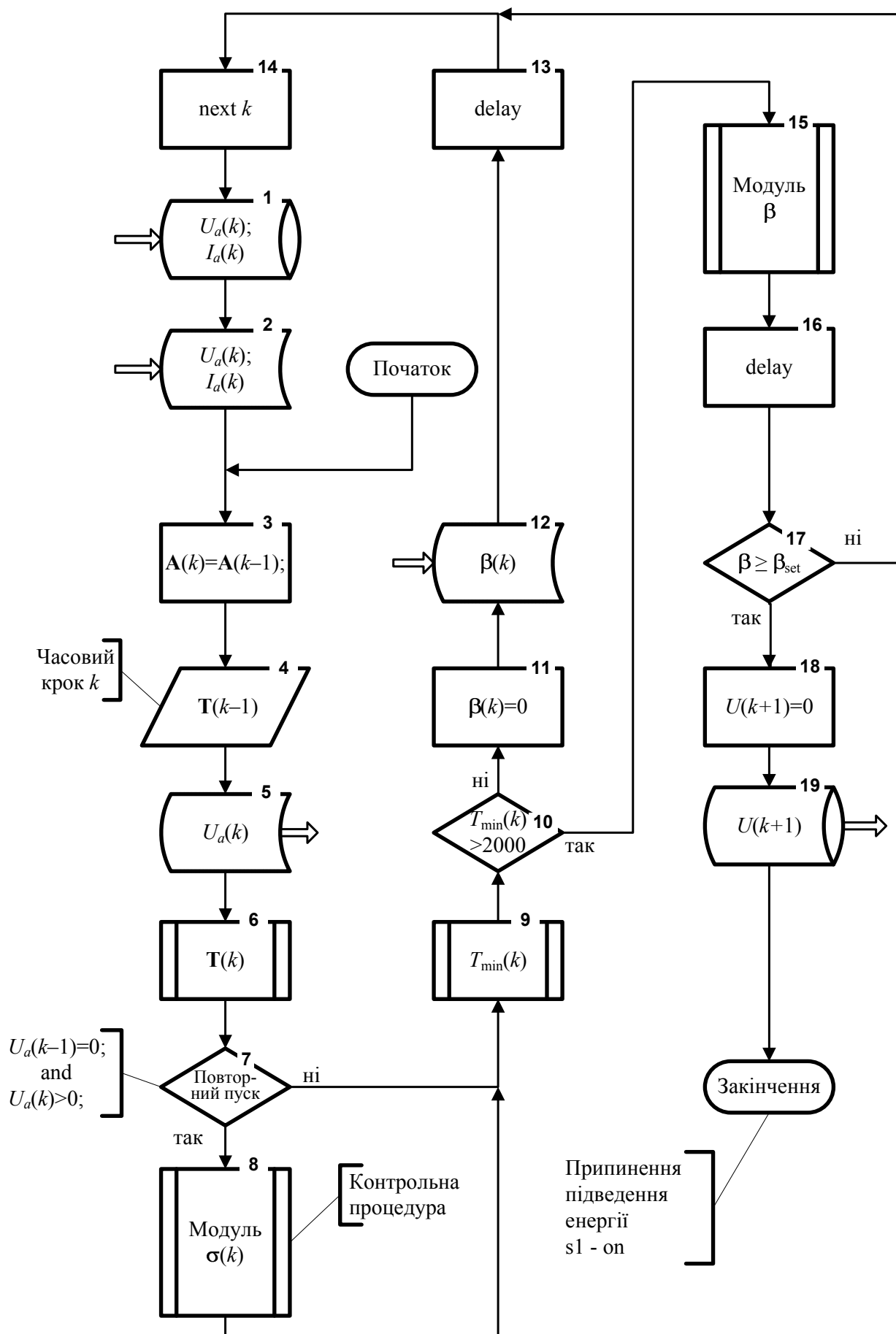


Рис. 5.4. Структурна схема алгоритму керування стадією графітації

4. Здійснюється узгодження модельного часу з реальним (блок 16) та виконується перевірка досягнутого ступеня графітації (блок 17). Дотримання умови (5.4) при $\beta = \beta(k)$ свідчить про завершення кампанії графітації і система керування нижнього рівня отримує команду припинення живлення печі (блоки 18, 19, селектор $s1$). В іншому випадку виконується наступний пункт.

5. Встановлюється номер чергового кроку k (блок 14), вимірюються поточні значення змінних об'єкта $I_a(k)$ та $U_a(k)$, які записуються в базу даних (блоки 1, 2), та повторюється пункт 1.

5.2.2. Алгоритм прогнозування ступеня графітації.

Розглянутий алгоритм дозволяє оцінити поточний ступінь графітації, але момент припинення живлення печі τ_k , визначений на основі поточних оцінок призводить до перевитрат енергії, оскільки графітація в характеристичній точці триває і після завершення кампанії (весь час, доки температура в точці перевищує 2000 °C, п. 4.4.3).

Для забезпечення оптимальності керування другою стадією в сенсі критерію (3.12), час τ_k необхідно визначати на кожному кроці k шляхом прогнозування ступеня графітації в характеристичній точці після припинення підведення енергії [152]. В цьому випадку модуль оцінювання ступеня графітації (блок 15 на рис. 5.4), слід реалізувати на основі процедури, структурну схему алгоритму якої зображено рис. 5.5.

1. Для кожного поточного кроку k (в реальному часі) на основі попередніх оцінок (блок 1) визначається ступінь графітації (блок 2) і ці значення зберігається в базі даних (блок 3).

2. Поточний температурний стан задається як початкова умова електро-термічної задачі (блок 5) для наступного кроку n (блок 4), який буде здійснено в прискореному масштабі часу при вимкненому живленні (блок 6).

3. На кроці n розраховується прогнозна оцінка $T(n)$ температурного стану печі (блок 7) і визначається прогноз $T_{\min}(n)$ температури в характеристичній точці (блок 8).

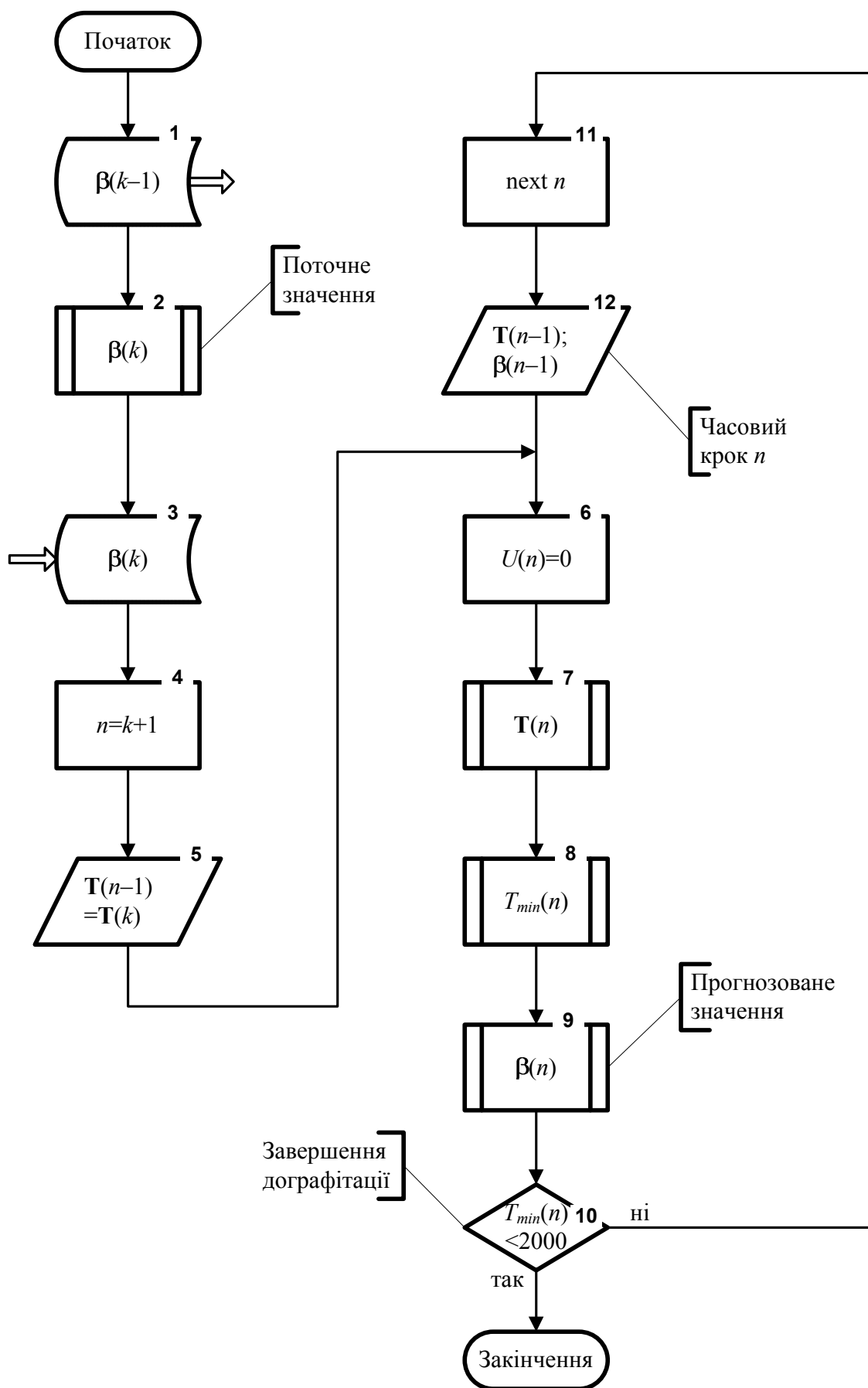


Рис. 5.5. Структурна схема алгоритму прогнозування ступеня графітації

4. Прогноз ступеня графітації в характеристичній точці визначається на основі вже досягнутого ступеня (5.5) за формулою (блок 9):

$$\beta(n) = \beta(k) + \sum_{j=k+1}^n \beta(j), \quad (5.6)$$

і здійснюється перевірка температурного діапазону (блок 10). Якщо в характеристичній точці графітація припинилась, поточна оцінка тривалості кампанії визначається як

$$\begin{cases} \tau_{\text{e}}(k) = k \cdot \psi ; \\ T_{\text{min}}(n) < 2000, \end{cases} \quad (5.7)$$

в іншому випадку робиться наступний крок n в прискореному масштабі часу (блок 11) з початковими умовами, визначеними на попередньому кроці $n - 1$ (блок 12).

Оцінка (5.7) уточнюється на кожному реальному кроці до виконання умови (5.4) при $\beta = \beta(n)$.

5.3. Керування процесом графітації в нештатному режимі

Представлені алгоритми керування стадіями кампанії графітації забезпечують мінімізацію енерговитрат при роботі печі в штатному режимі. На жаль сучасна виробнича практика показує, що частими є ситуації, коли під час кампанії графітації відбувається тимчасове припинення живлення печі $U_a(k) = 0$, здебільшого пов'язане з регіональним регулюванням споживання електроенергії промисловими підприємствами [154].

Зокрема таке явище спостерігалось в обох експериментальних кампаніях графітації (розділ 2). В кампанії з ординарним регламентом простій склав близько 8 год., а в кампанії з форсованим регламентом – більше 1 год. (рис. 2.9 .. 2.11).

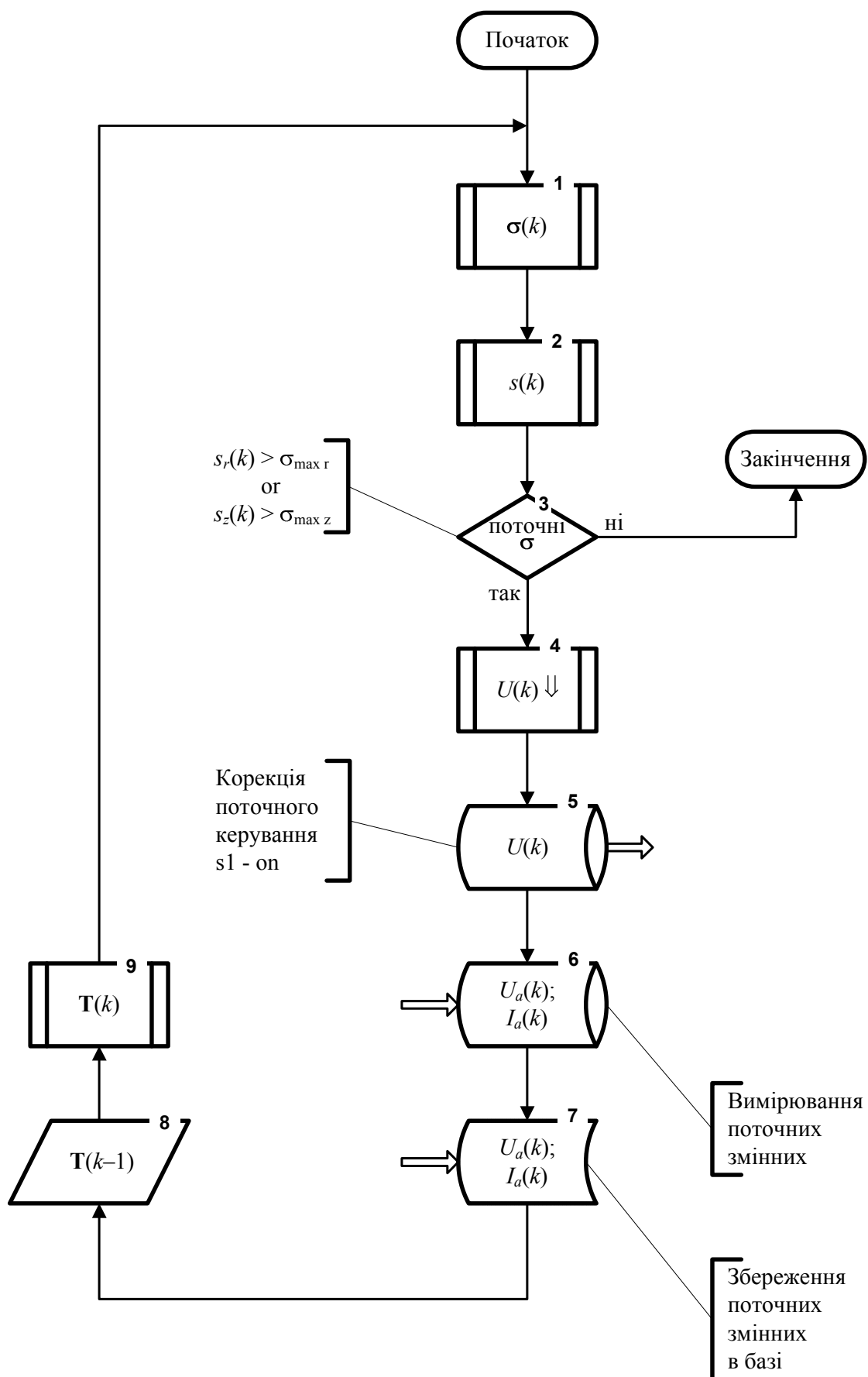


Рис. 5.6. Структурна схема алгоритму корекції керування в нештатному режимі

Короткочасні зупинки печі (до 20 хв.) не спричиняють істотних змін в динаміці основних процесів об'єкта і не потребують додаткових заходів корекції. При цьому пуск печі після тривалої зупинки (більше 1 год.) з електричною напругою, визначеною системою керування у відповідності до алгоритмів штатного режиму, потенційно здатен викликати небезпечні термічні напруження у виробках (рис. 4.25). Назвемо таку ситуацію нештатним режимом роботи печі графітації.

Для корекції напруги печі в нештатному режимі алгоритми керування стадіями кампанії містять модуль (блок 15 на рис. 5.1 та блок 8 на рис. 5.4), що реалізує контрольну процедуру, структурна схема алгоритму якої зображена на рис. 5.6.

1. За оцінкою температурного стану печі $T(k)$ наприкінці поточного кроку, отриманій для поточного керування $U_a(k)$, за допомогою моделі (4.35) .. (4.39) оцінюється термопружний стан заготовок середнього ряду $\sigma(k)$ (блок 1) та згідно з (3.11) розраховуються максимальні абсолютні напруження в радіальному $s_r(k+1)$ та осьовому $s_z(k+1)$ напрямках заготовки середнього ряду (блок 2).

2. Здійснюється перевірка умови (5.3) (блок 3) і у випадку, коли термічні напруження не становлять загрози, подальше керування відбувається в штатному режимі. В іншому випадку виконується наступний пункт.

3. Виконання цього пункту означає, що при поточному керуванні $U_a(k)$ наприкінці поточного кроку термічні напруження в заготовках перевищать максимально припустимі. В цьому випадку поточне керування зменшується (блок 4) і одразу встановлюється на об'єкті (блок 6) незалежно від того, яка стадія кампанії графітації триває (селектор $s1$). Далі вимірюються поточні змінні об'єкта (блок 6) і зберігаються в базі даних (блок 7) замість отриманих раніше (в штатному режимі).

4. Після цього визначається нова оцінка температурного стану об'єкта на момент закінчення поточного кроку k (блоки 8, 9) і повторюється пункт 1.

Таким чином, алгоритм забезпечує зменшення поточного керування до безпечного рівня і дозволяє здійснювати наступні кроки в штатному режимі.

При керуванні стадією розігріву контрольна процедура виконується на кожному кроці (блок 15 на рис. 5.1), як запобіжний засіб, що гарантує цілість виробів не тільки в нештатному режимі, а і при можливому неточному відпрацюванні системою нижнього рівня стратегії, визначеної системою верхнього рівня $U(k)$.

Керування підведенням потужності на другій стадії здійснює система нижнього рівня. На цій стадії імовірність пошкодження виробів внаслідок термічних напружень значно зменшується [3, с. 48], тому контрольна процедура (блок 8 на рис. 5.4) виконується тільки при повторному пуску печі після тимчасового простою. Ця подія визначається (блок 7 на рис. 5.4) шляхом перевірки умови:

$$\begin{cases} U_a(k-1) = 0; \\ \text{and} \\ U_a(k) > 0. \end{cases}$$

5.4. Дослідження системи керування процесом графітації

За наведеним алгоритмом для розглянутої печі графітації з параметрами енергетичної установки $U_{\max} = 300$ В та $I_{\max} = 100$ кА розраховано оптимальне керування $U^{\text{opt}}(k)$ при $\xi = 0.2$ МПа; $\psi = 1$ год (рис. 5.7). Час припинення підведення енергії визначено з умови 98-процентної графітації периферії верхнього горизонтального ряду заготовок.

Результати розрахунку інших електричних параметрів представлено на рис. 5.8 .. 5.10 (тут і надалі верхній індекс **opt** стосується оптимальних параметрів). Для порівняння на рисунках зображено відповідні параметри, отримані під час експериментальної кампанії з ординарним регламентом (тут і надалі верхній індекс **e** стосується експериментальних даних).

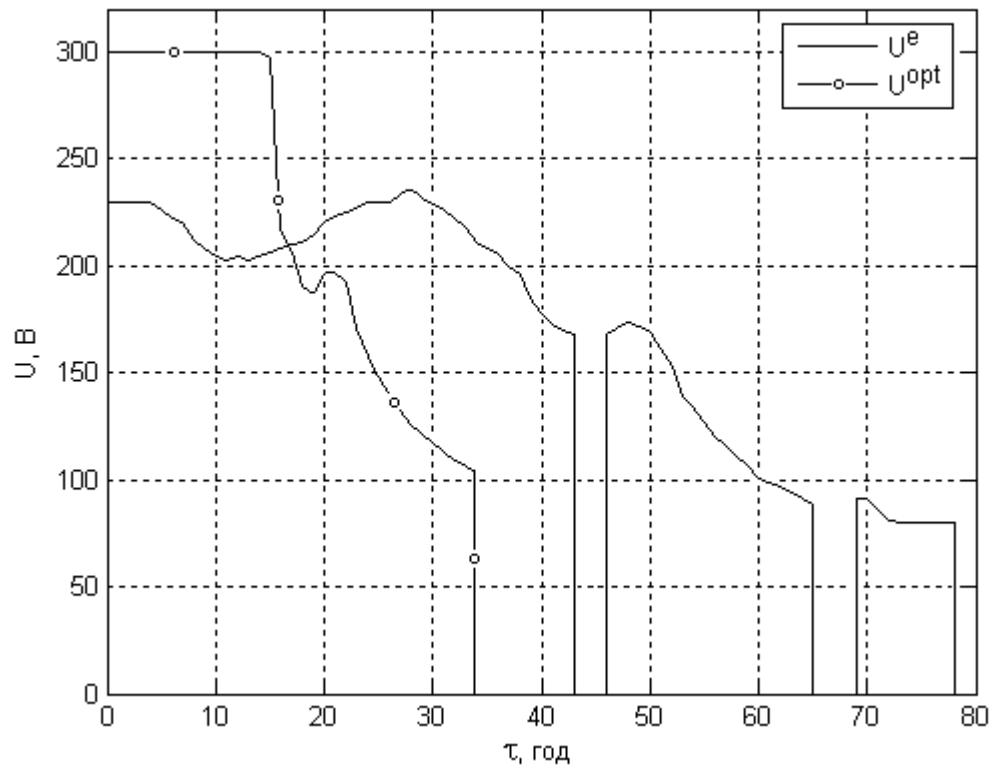


Рис. 5.7. Динаміка напруги печі графітації

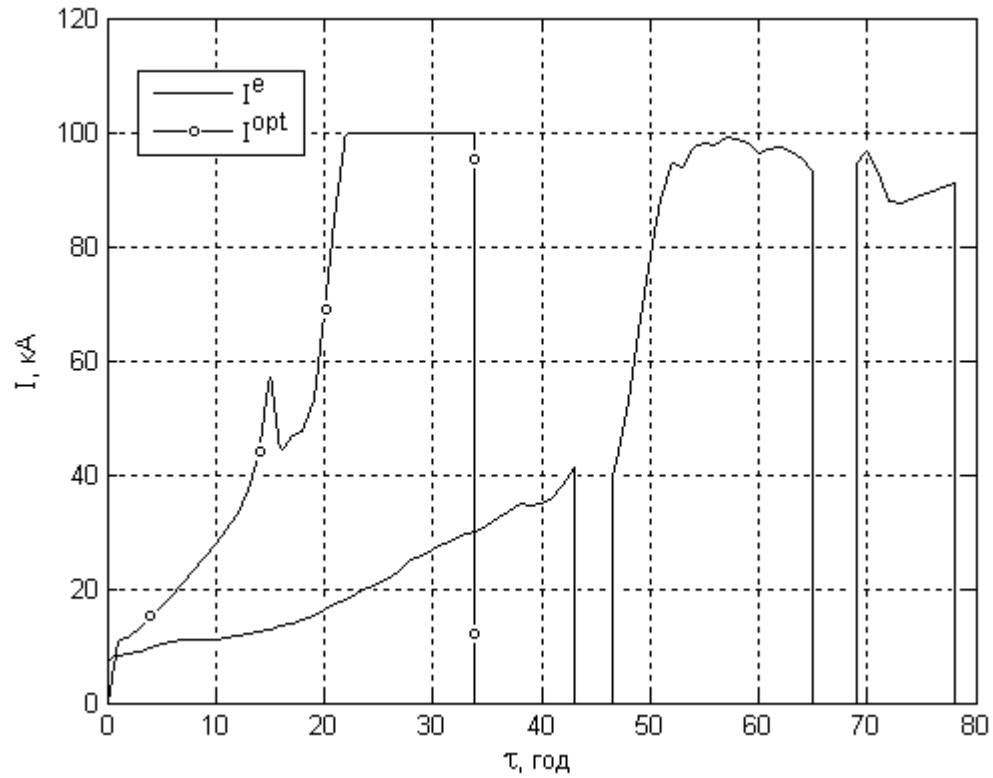


Рис. 5.8. Динаміка сили струму печі графітації

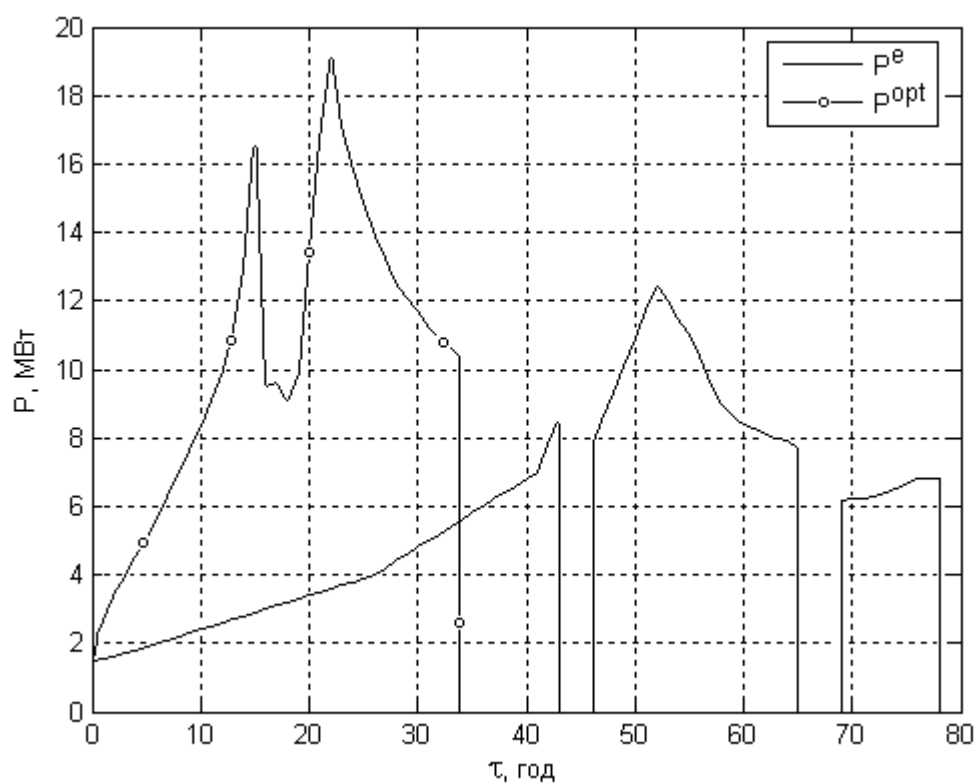


Рис. 5.9. Динаміка потужності печі графітації

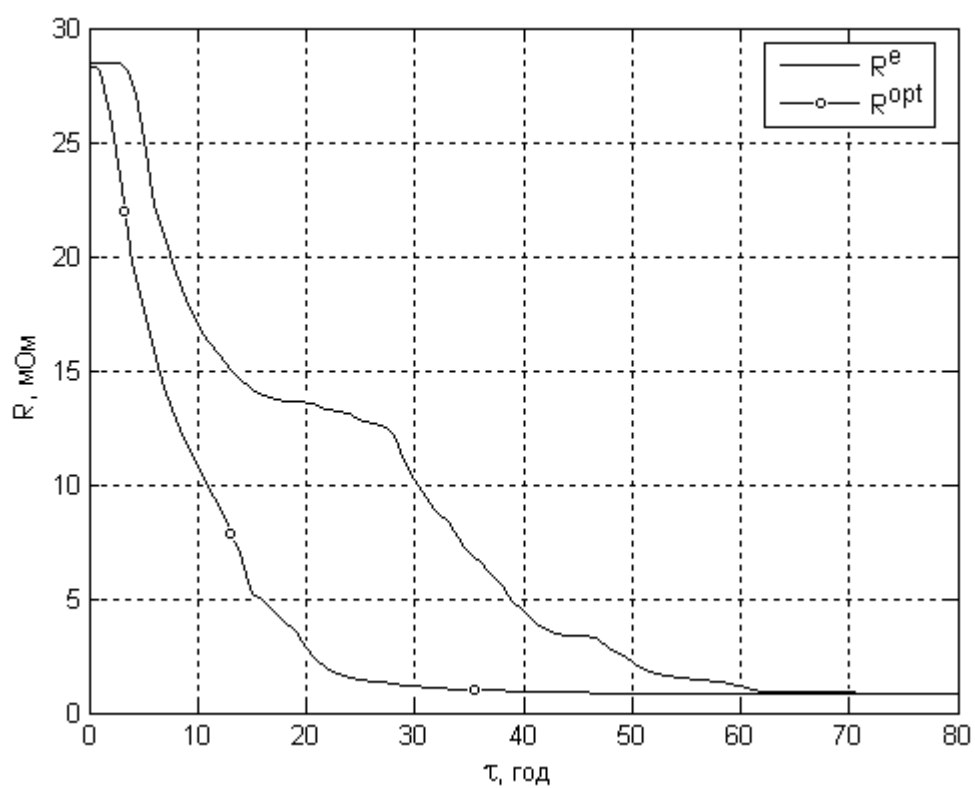


Рис. 5.10. Динаміка електричного опору печі графітації

Використання методу визначення моменту припинення підведення потужності (4.44) в реальному часі (п. 5.2.1) для $U^{\text{opt}}(k)$ зменшує тривалість кампанії більш ніж вдвічі (до 37 год. в порівнянні з 78 год. в експериментальній кампанії). Застосування прогнозуючого алгоритму (п. 5.2.2) скорочує тривалість кампанії до 33 год., що істотно скорочує енерговитрати (оскільки піч в цей час працює на високій потужності, рис. 5.9). Переваги алгоритму з прогнозуванням наглядно ілюструє різниця в динаміці температури характеристичної точки (рис. 5.11).

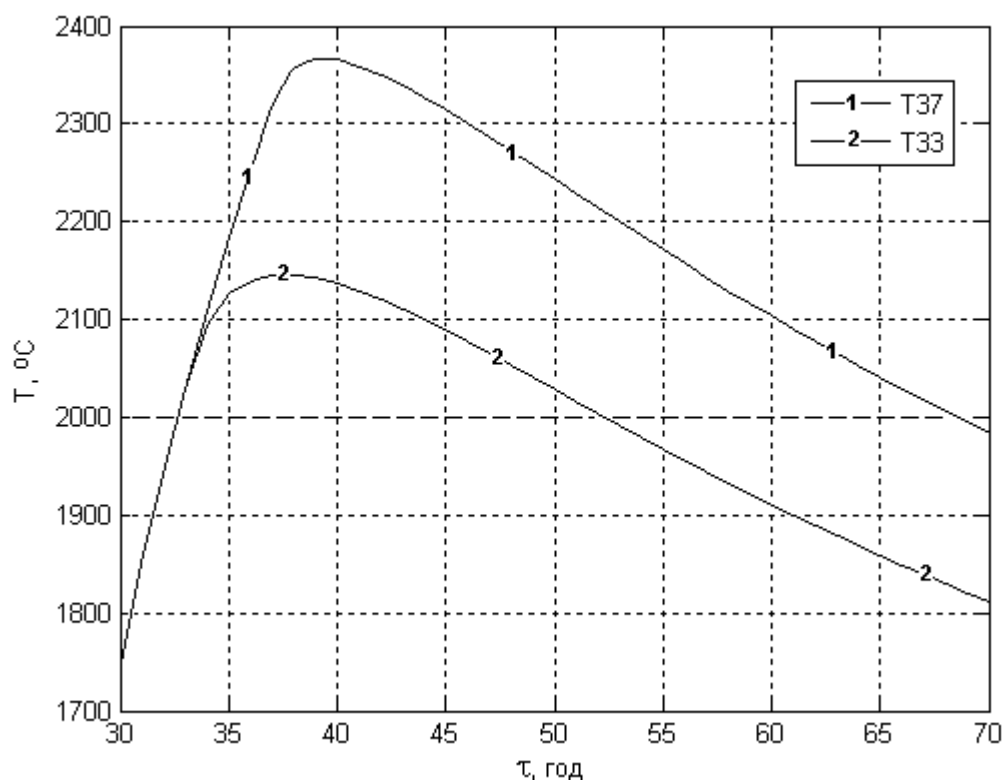


Рис. 5.11. Динаміка температури характеристичної точки

Результати моделювання температурного поля печі з оптимальним керуванням при тривалості кампанії 33 год. наведено в додатку Е.

Питомі енергетичні витрати в кампанії з оптимальним керуванням оцінюються в 4672 кВт·год на тонну продукції (при 6070 кВт·год/т в експериментальній кампанії та 5800 кВт·год/т за ординарним регламентом), що складає від 15 до 18 % економії електроенергії.

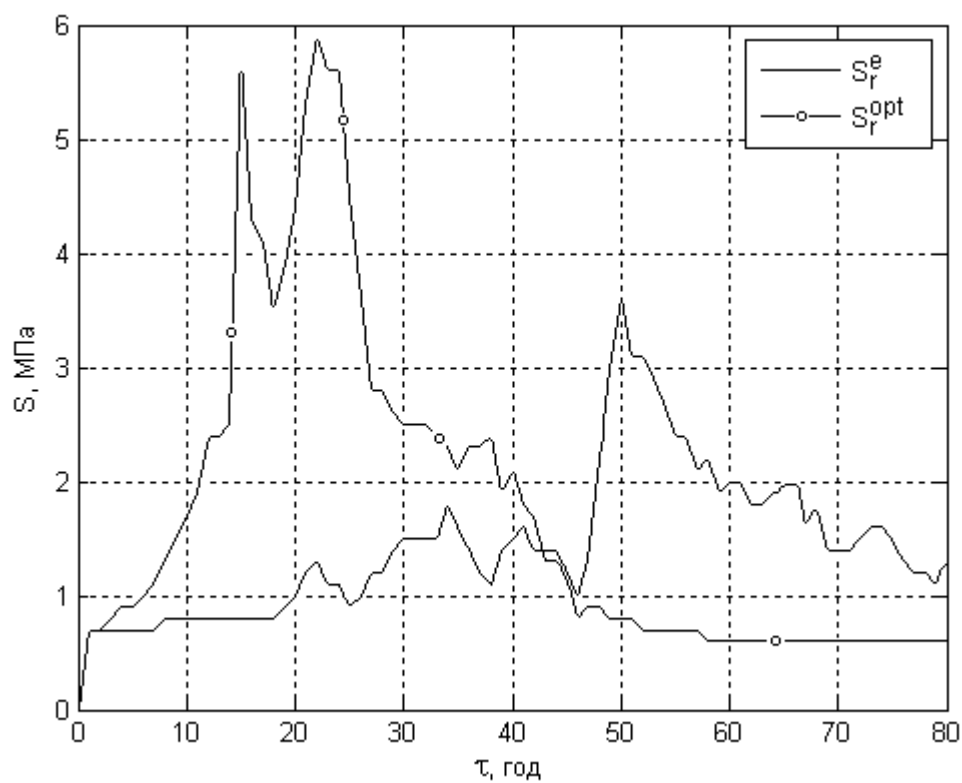


Рис. 5.12. Динаміка максимальних абсолютних радіальних напружень,

$$\sigma_r^{\text{tens}} = 7 \text{ МПа}$$

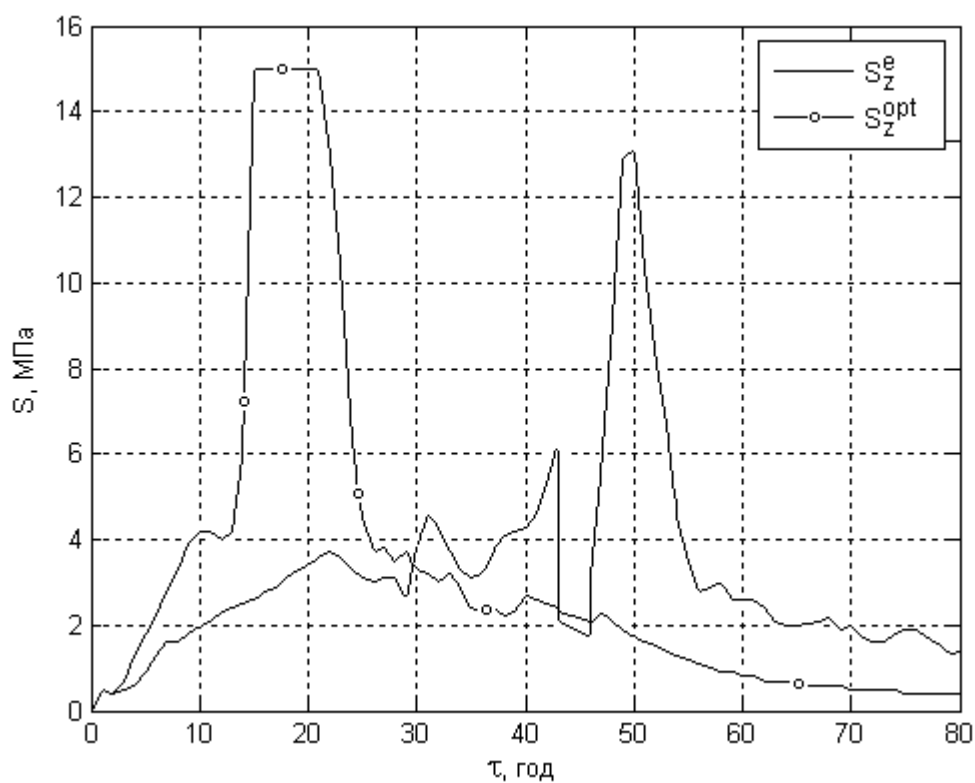


Рис. 5.13. Динаміка максимальних абсолютних осьових напружень,

$$\sigma_z^{\text{tens}} = 15.2 \text{ МПа}$$

Розглянемо оціночну динаміку максимальних абсолютних напружень в радіальному s_r та осьовому s_z напрямках заготовок середнього горизонтального ряду для кампанії з оптимальним керуванням (рис. 5.12 та 5.13 відповідно). Для порівняння на рисунках також наведено відповідні показники ординарної кампанії.

Як видно з рис. 5.13, визначення оптимальної стратегії впродовж першої стадії здійснено виключно за осьовими напруженнями. Піки зростання радіальних напружень (рис. 5.12) викликані піками зростання потужності печі (рис. 5.9). При цьому перший пік зростання потужності відповідає досягненню границі міцності на розтягнення матеріалу виробів в осьовому напрямку (рис. 5.13), а другий пік відповідає досягненню максимального значення струму печі $I_{\max}$ (рис. 5.8) та початку другої стадії кампанії.

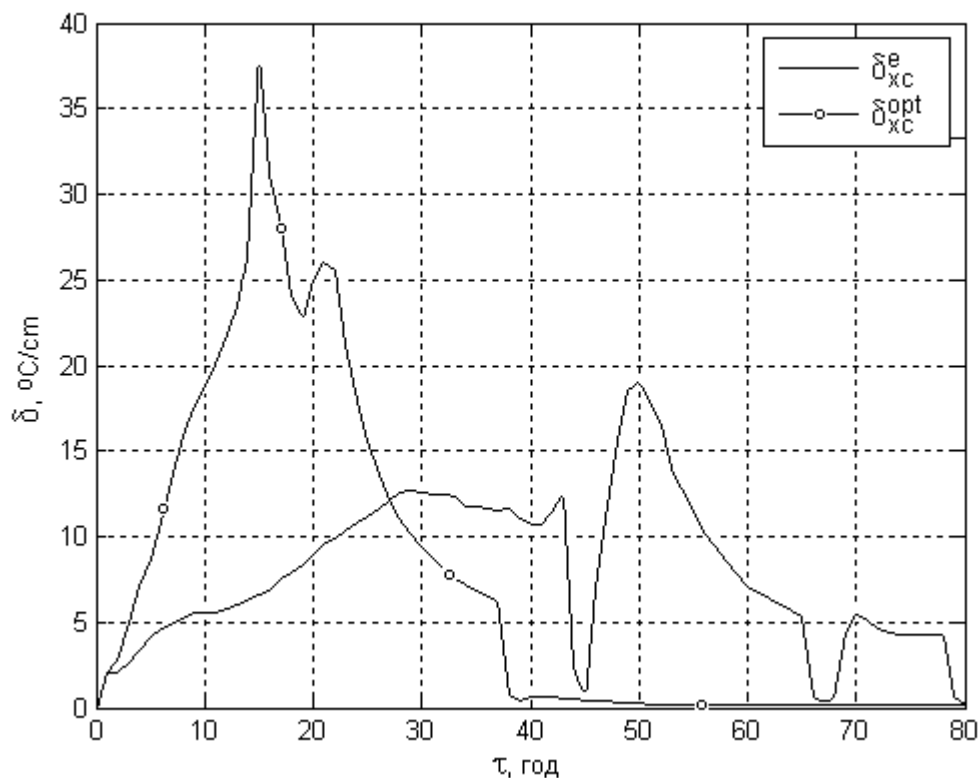


Рис. 5.14. Динаміка відносного радіального перепаду температур в центрі заготовок

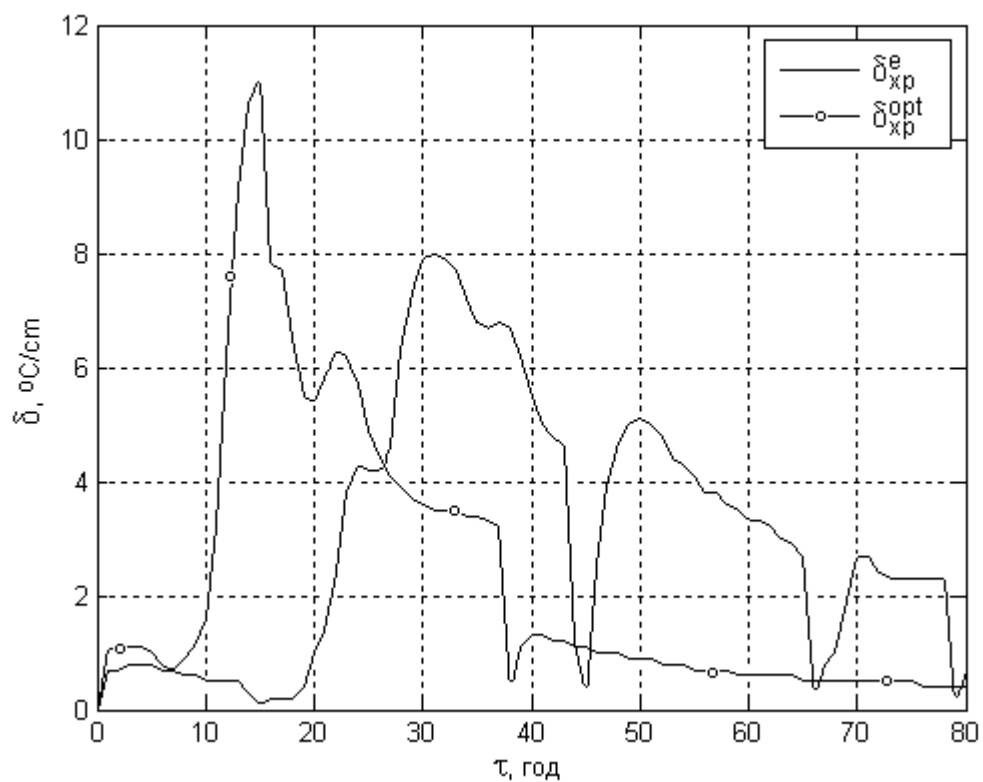


Рис. 5.15. Динаміка відносного радіального перепаду температур на периферії заготовок

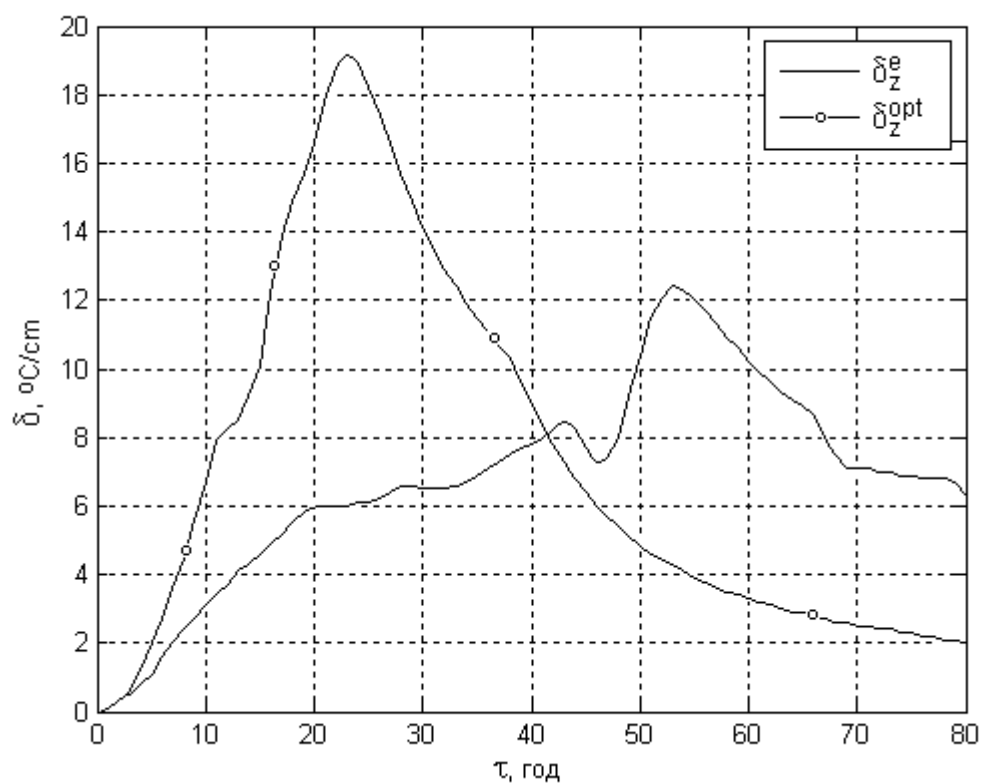


Рис. 5.16. Динаміка відносного осевого перепаду температур

Розглянемо динаміку максимальних відносних перепадів температур в заготовках середнього горизонтального ряду для кампанії з оптимальним керуванням (рис. 5.14 .. 5.16). Для порівняння на рисунках також наведено відповідні показники ординарної кампанії.

Як видно з рисунків, максимальний перепад температур спостерігається в радіальному напрямку центральної частини заготовки на 15-ій годині кампанії. Цей момент кампанії можна вважати критичним, тому що неточне визначення керування $U(k)$ на цьому етапі може спричинити руйнування виробів.

Весь період кампанії, коли термічні напруження в заготовках відповідають умові (5.1), тобто перебувають біля межі міцності, швидкість розігріву їх центральної частини складає 169 .. 286 °C/год., при цьому швидкість зміни рівня напружень не перевищує 0.9 МПа/год. Для заявленої точності моделі температурного поля 10 % (п. 4.2.5), обрана точність визначення напружень в заготовках $\xi = 0.2$ МПа гарантує дотримання обмеження (3.9) навіть при “грубому” оцінюванні керування на наступний крок (блок 16 на рис. 5.1). Хоча на 15-ій годині загальний обсяг розрахунків в процедурі адаптації (блок 11 на рис. 5.1) ще порівняно невеликий і система керування верхнього рівня має достатньо часу (у межах ψ) для реалізації варіаційних процедур визначення керування на наступний крок навантаження із високою точністю.

5.5. Висновки до розділу 5

1. Розроблено алгоритм керування стадією розігріву, що генерує поточне керування на основі аналізу термопружного стану виробів.

2. Розроблено алгоритм адаптивної процедури для покрокової корекції електротермічної моделі процесу.

3. Розроблено алгоритм визначення тривалості кампанії графітації на основі аналізу ступеня графітації в характеристичній точці виробів.

4. Розроблено алгоритм прогнозування ступеня графітації в характеристичній точці виробів, що дозволяє істотно скоротити тривалість кампанії графітації.

5. Система керування верхнього рівня, реалізована на основі розроблених алгоритмів, здатна забезпечити економію електроенергії до 15 % на кожну кампанію графітації та істотно скоротити тривалість кампанії.

ВИСНОВКИ

Монографія присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної задачі – зменшення енергоємності промислового процесу графітації в печах Ачесона постійного струму шляхом створення автоматизованої системи керування даним технологічним процесом. Розроблена система дозволяє зменшити енерговитрати на кожну кампанію графітації при гарантованій високій якості кінцевої продукції, а також забезпечує скорочення виробничого цикла та збільшення коефіцієнта використання обладнання, що підвищить ефективність всього графітового виробництва та зменшить собівартість одиниці кінцевої продукції. Основні висновки і результати роботи полягають у наступному.

1. На основі аналізу промислової практики, узагальнення сучасного стану автоматизації в графітовому виробництві, виконаних експериментальних та теоретичних досліджень запропоновано нові підходи до розв'язання науково-технічної задачі створення автоматизованої системи керування процесом графітації а печах Ачесона постійного струму, які полягають у застосуванні в алгоритмах системи математичних моделей станів для синтезу оптимальних стратегій керування для всіх стадій та режимів цього технологічного процесу, що забезпечує зменшення енерговитрат на графітацію при гарантованій якості кінцевої продукції та сприяє підвищенню ефективності графітового виробництва в цілому.

2. В результаті виконаних експериментальних досліджень промислового процесу графітації в печах Ачесона постійного струму виявлено особливості протікання електричних та термічних процесів в печі графітації. На основі аналізу експериментальних даних для побудови системи керування запропоновано кампанію графітації розглядати як таку, що умовно складається з двох стадій, здійснено декомпозицію задачі керування процесом на дві часткові задачі. Сформульовано загальний критерій оптимальності та критерії оптимізації для часткових задач керування. Як загальний критерій обрані енерговитрати на графітацію. За критерій керування на першій стадії взято границі міцності на

розтягнення матеріалу виробів в осьовому та радіальному напрямках. Для другої стадії в якості критерію керування використовується ступінь графітації виробів.

3. Вперше запропоновано адаптивну модель температурного поля печі графітації, що враховує витрати енергії на випаровування вологи та здатна працювати в умовах неповної інформації про вологість та електро- і теплофізичні властивості матеріалів завантаження. Перевірка точності моделі показала, що максимальна відносна похибка визначення температури в керні печі графітації не перевищує 10 %.

4. Удосконалено модель термопружного стану виробів під час кампанії графітації, що враховує ортотропність властивостей та об'ємні термо-структурні перетворення вуглецевого матеріалу виробів. На основі моделі термопружного стану запропоновано новий метод керування процесом графітації в печах Ачесона, реалізація якого в системі керування забезпечує оптимальне ведення процесу.

5. Розроблено спрощену модель електричного поля керна печі графітації, що може використовуватись для оціночних розрахунків розподілу густини струму в міжрядовому просторі керна. Запропоновано методику розрахунку розподілу густини струму в міжрядовому просторі керна печі графітації при традиційній схемі пакетування заготовок $\varnothing 555$ мм.

6. Вперше розроблено метод оцінювання ступеня графітації виробів під час кампанії графітації, який дозволяє визначити необхідну тривалість кампанії графітації та може використовуватися як в алгоритмі системи керування, так і самостійно.

7. Створено та досліджено нові алгоритми керування стадіями процесу графітації, які на основі прогнозування стану виробів забезпечують близьке до оптимального ведення процесу графітації в печах Ачесона постійного струму. Розроблено дворівневу систему автоматизованого керування процесом графітації а печах Ачесона постійного струму, яка на базі створених алгоритмів здатна забезпечити економію електроенергії до 15 % на кожну кампанію графітації та істотно зменшити тривалість кампанії.

Експериментальне дослідження ординарної кампанії графітації

Заготовки	84×ЕГ550.
Схема пакетування	14×3×2
Корисна маса завантаження	70.5 т.
Тривалість кампанії	78 год 20 хв.
Загальний простій	7 год 40 хв.
Планова витрата енергії	408900 кВт·год.
Фактична витрата енергії	427900 кВт·год.
Питома витрата енергії	6069.5 кВт·год/т.

Схему розташування контрольних точок зображено на рис. 2.5 .. 2.8.

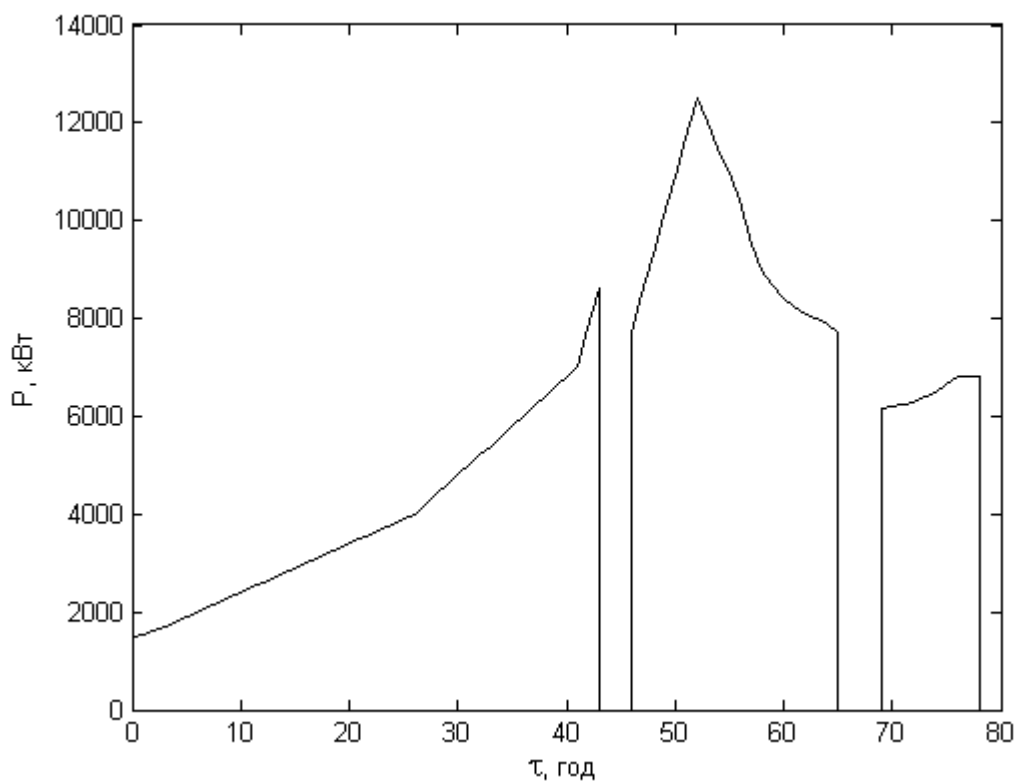


Рис. А.1. Графік підведення потужності

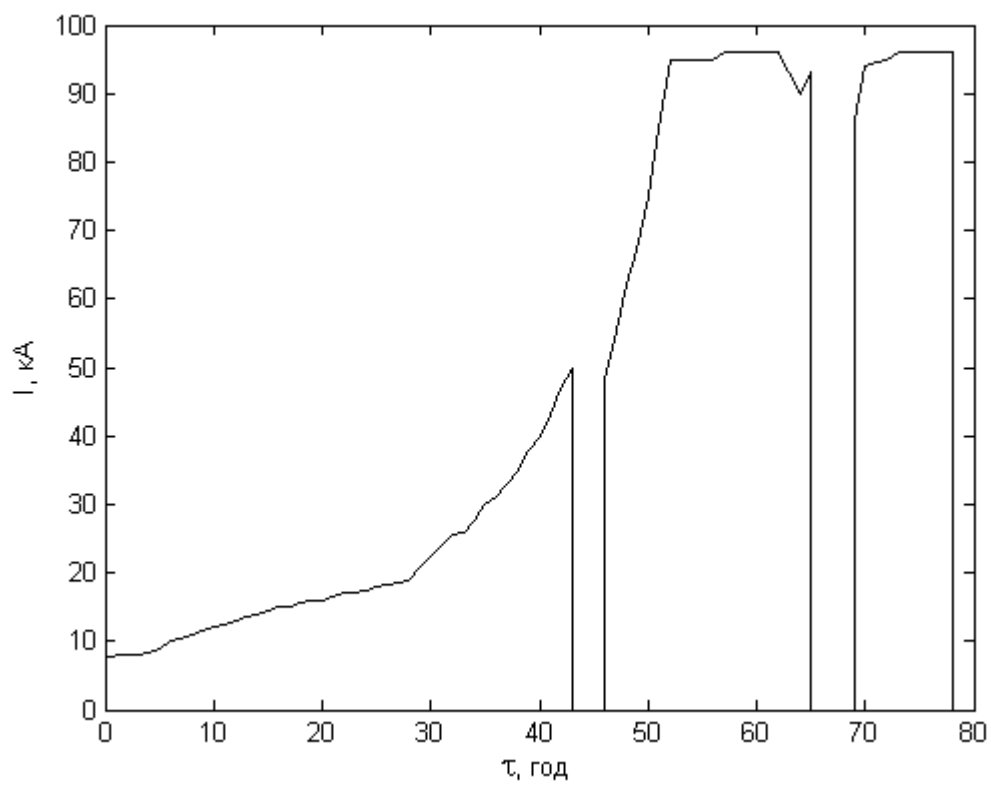


Рис. А.2. Динаміка сили струму печі графітації

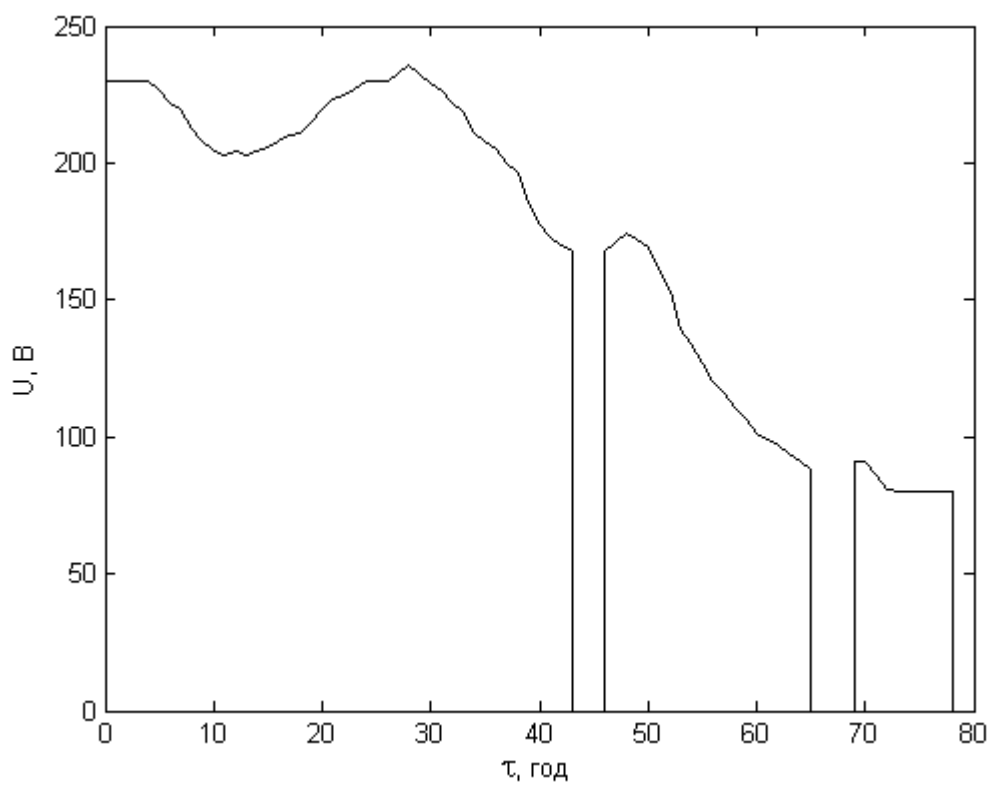


Рис. А.3. Динаміка напруги печі графітації

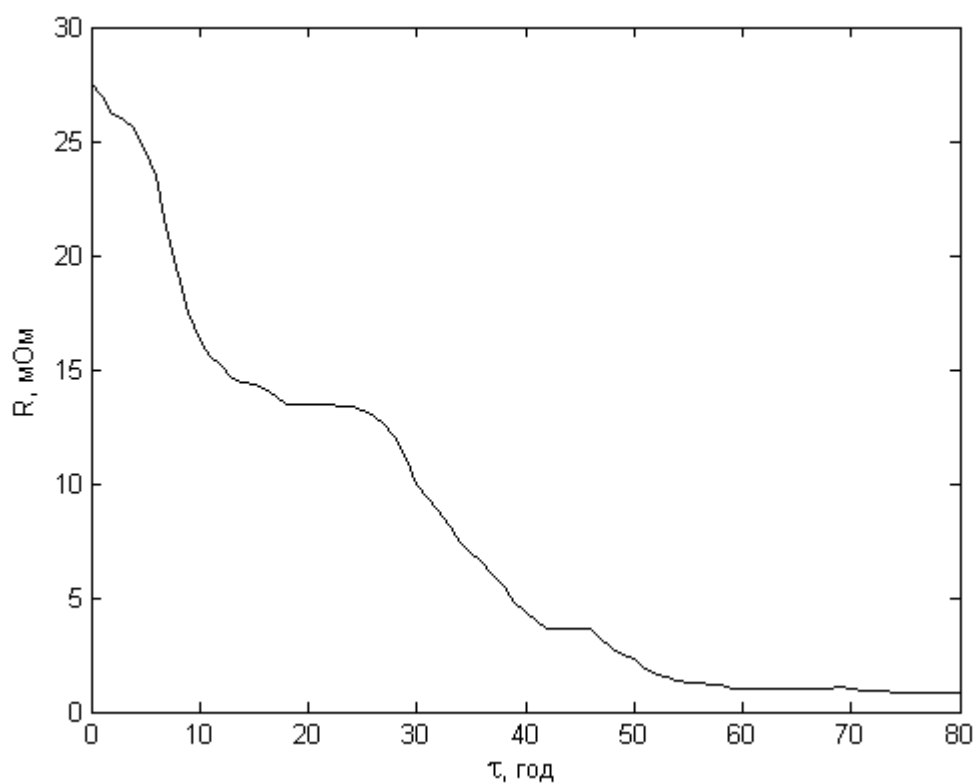


Рис. А.4. Динаміка електричного опору печі графітації

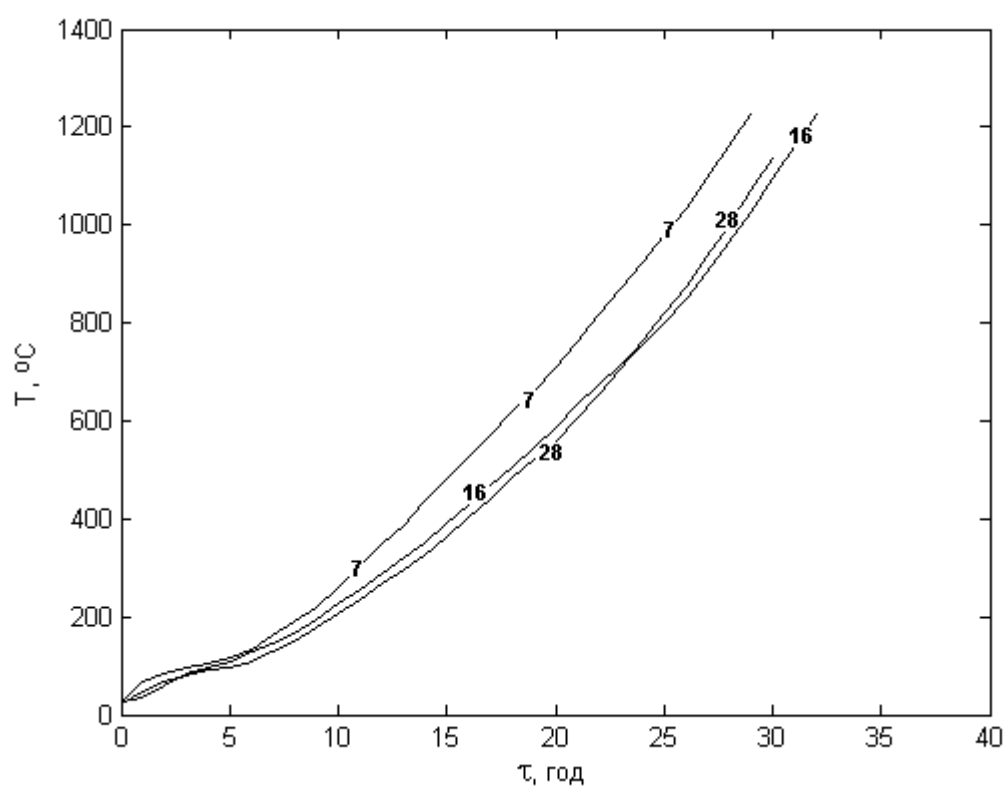


Рис. А.5. Динаміка температури в центрі заготовок верхнього ряду

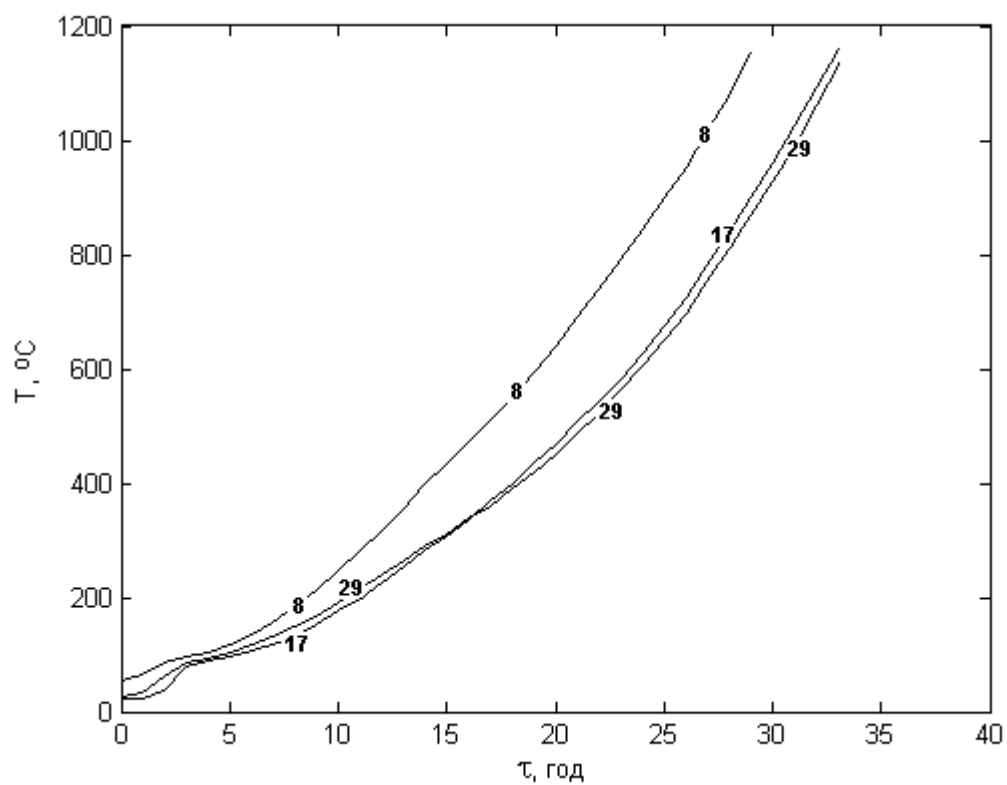


Рис. А.6. Динаміка температури в заготовках верхнього ряду на відстані 470 мм від центру в осьовому напрямку

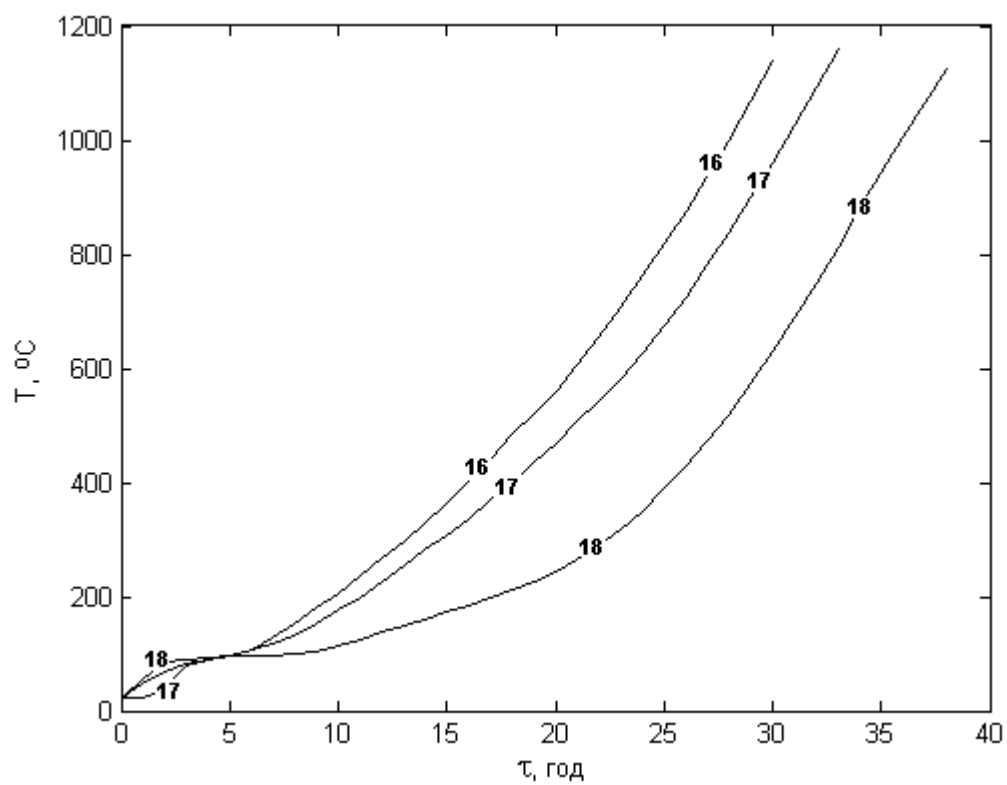


Рис. А.7. Динаміка температури вздовж осі заготовки верхнього ряду в перерізі № 2

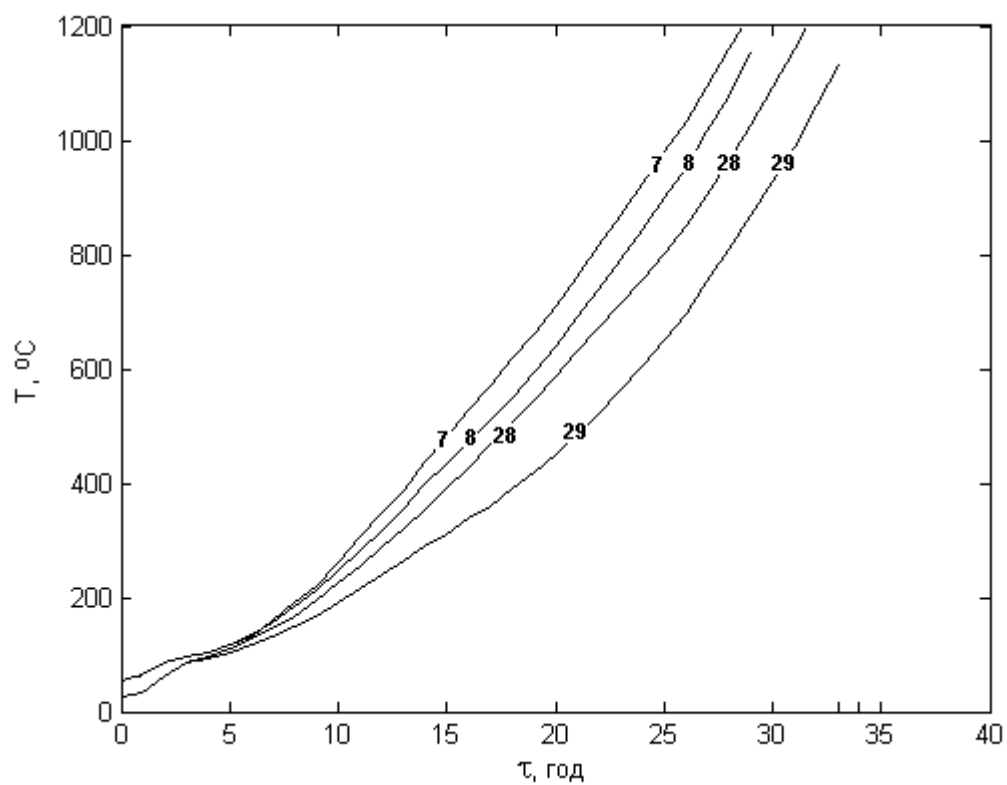


Рис. А.8. Динаміка температури вздовж осі заготовок верхнього ряду
в перерізі № 1 та № 3

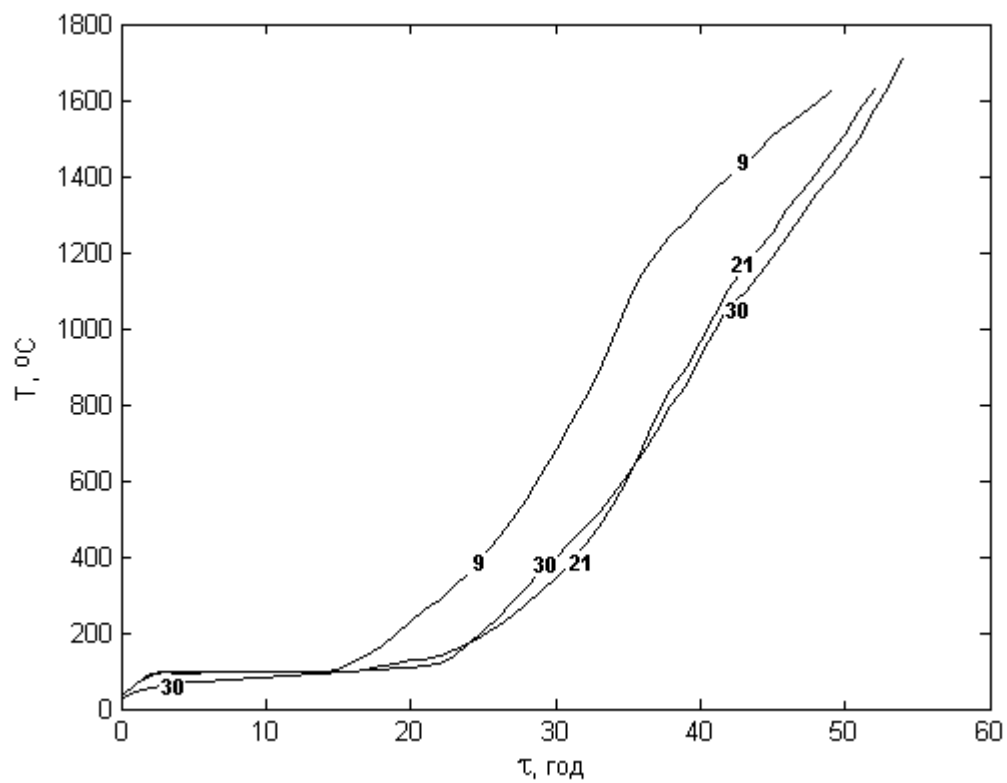


Рис. А.9. Динаміка температури на периферії заготовок верхнього ряду

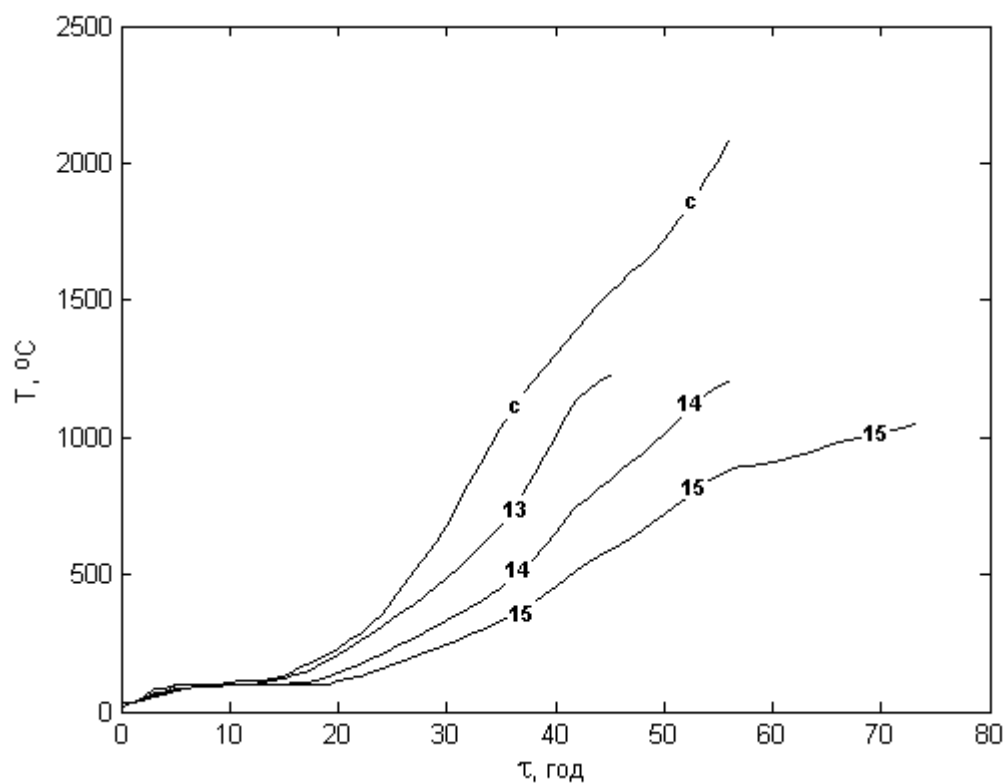


Рис. А.10. Динаміка температури на периферії заготовки середнього ряду
в перерізі № 2 та вздовж вимірювального тепловоду

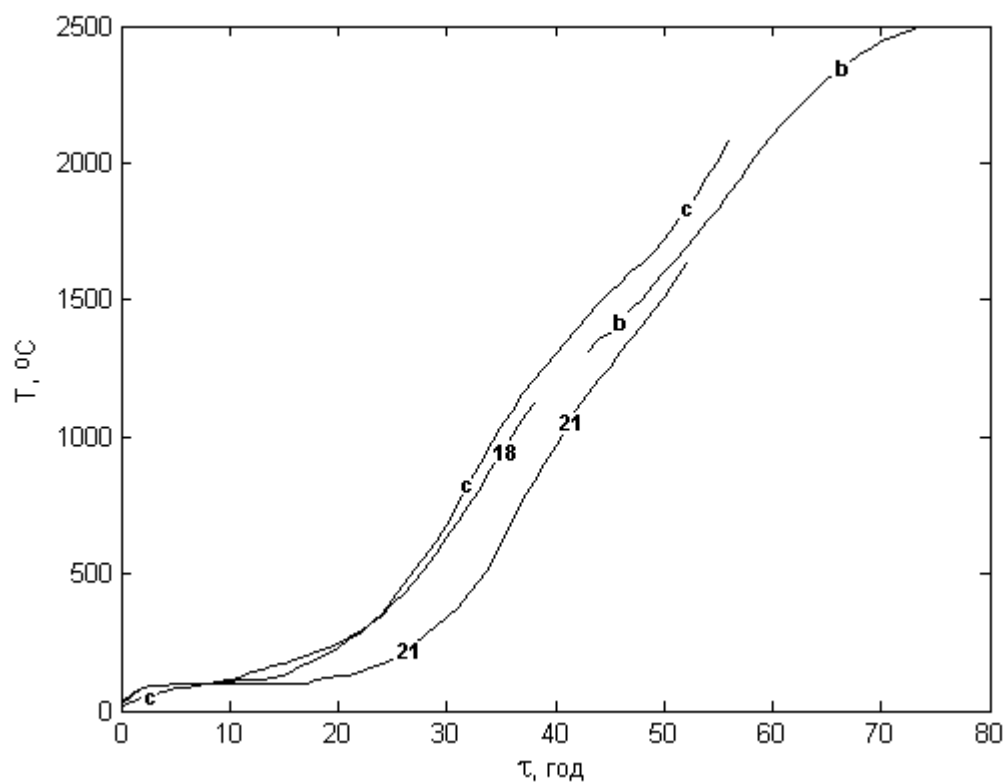


Рис. А.11. Динаміка температури на периферії заготовок
верхнього та середнього ряду

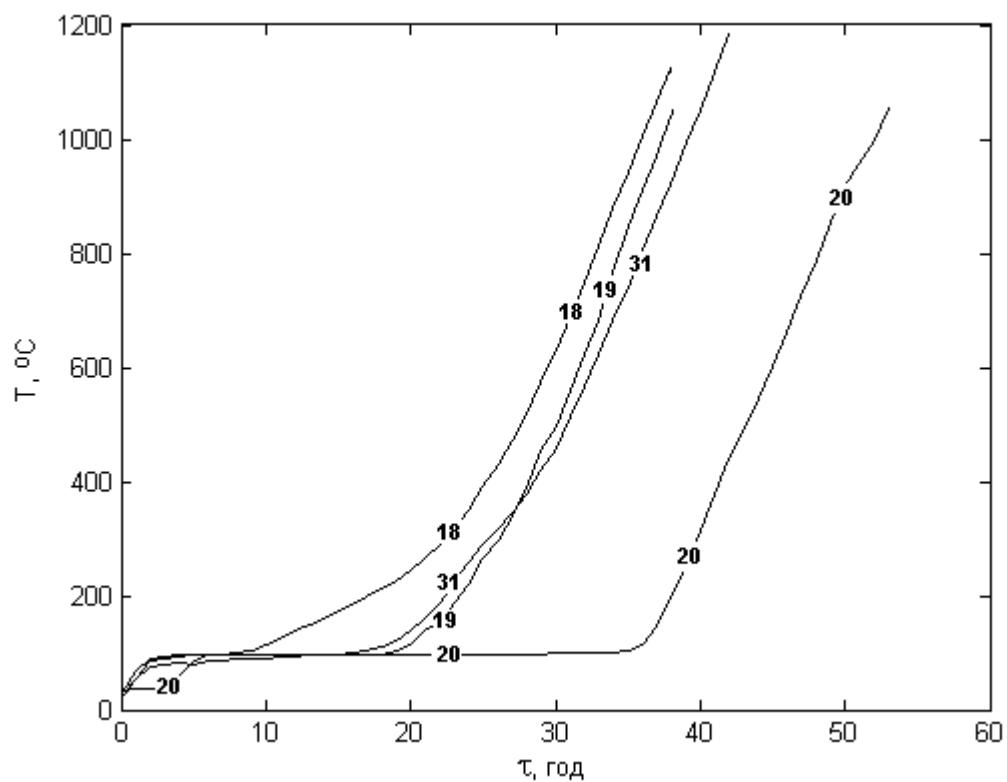


Рис. А.12. Динаміка температури теплоізоляції біля заготовки верхнього ряду в перерізі № 2 (для порівняння також наведена температура периферії заготовки)

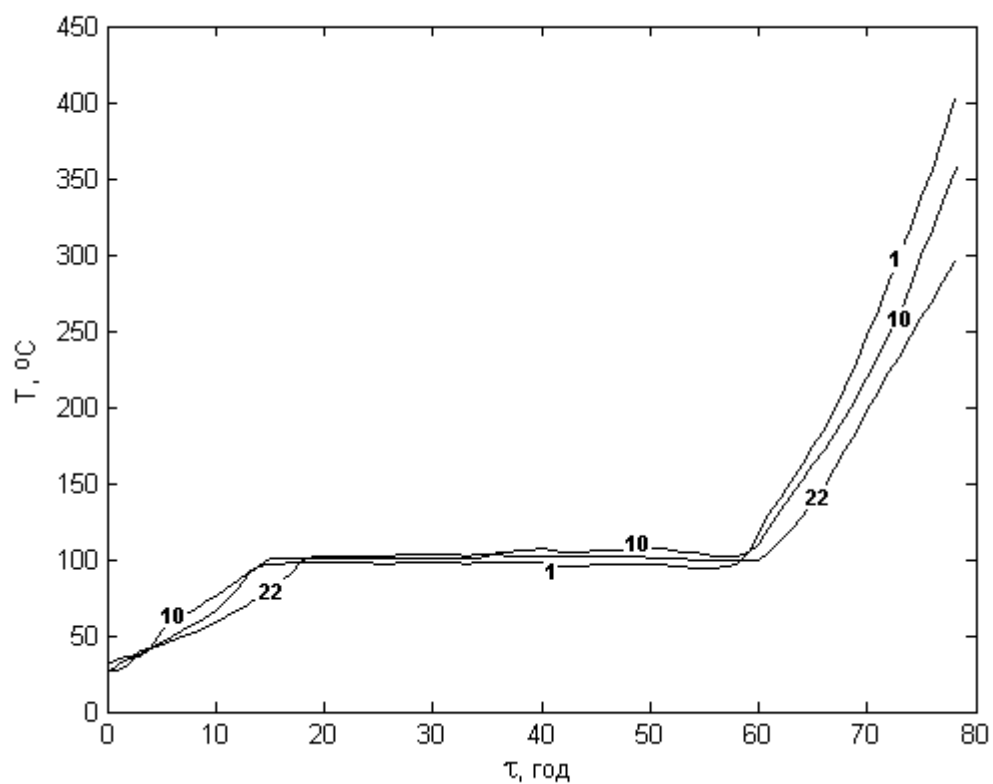


Рис. А.13. Динаміка температури подової теплоізоляції біля шамотної кладки

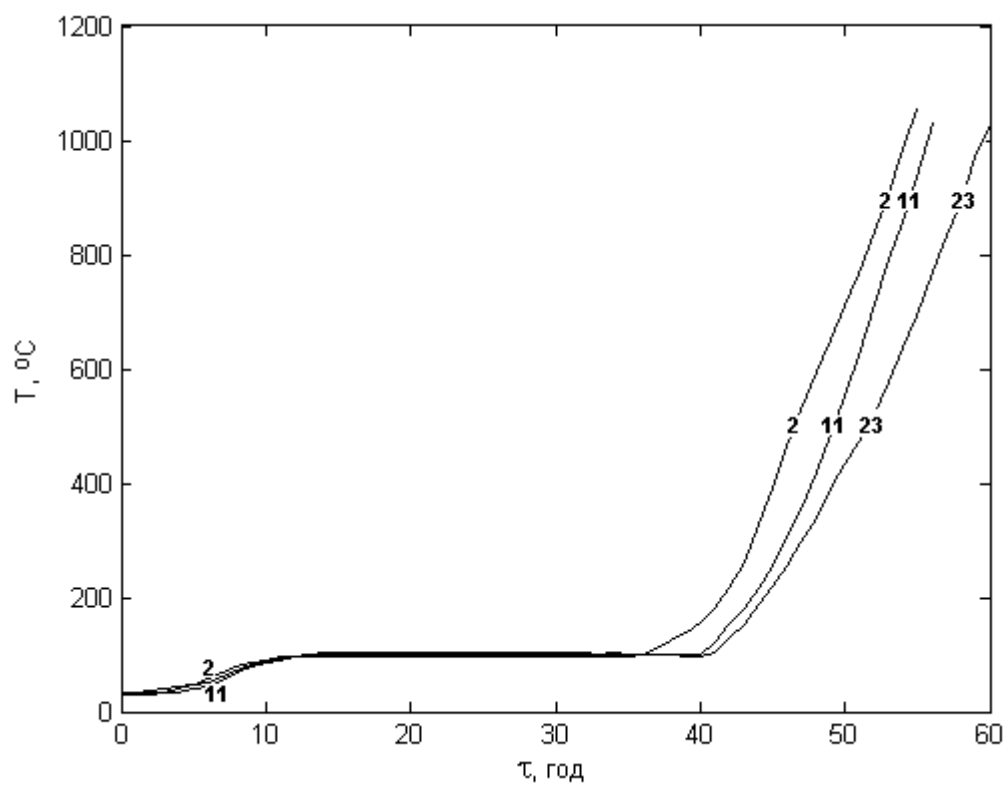


Рис. А.14. Динаміка температури подової теплоізоляції біля центральної частини керна

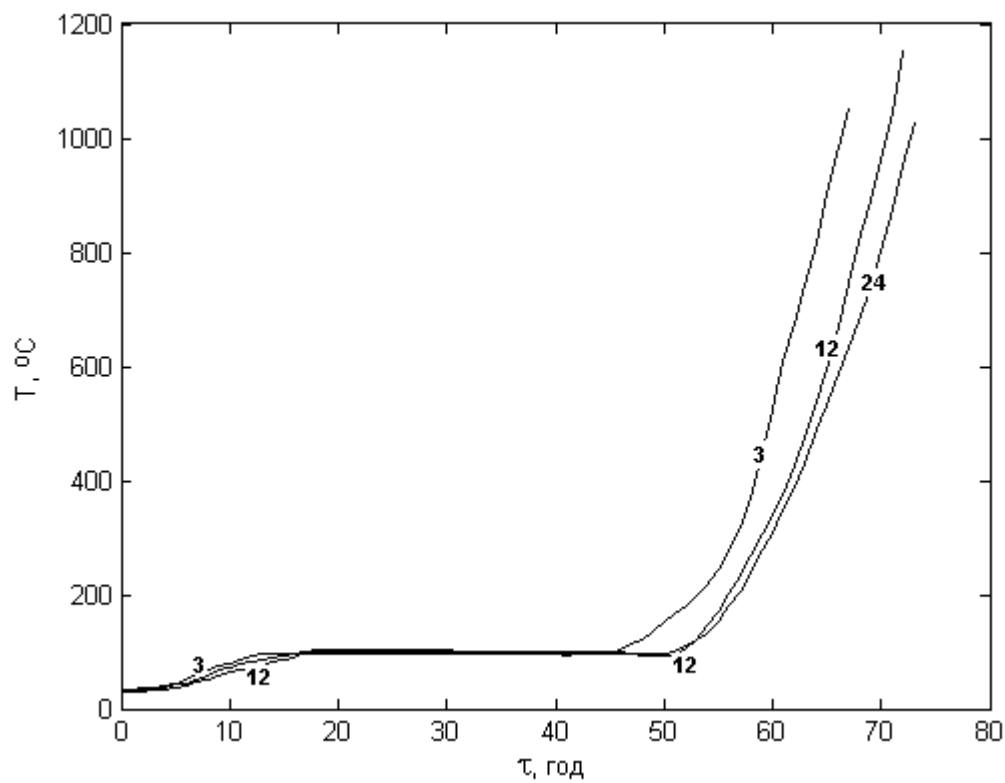


Рис. А.15. Динаміка температури подової теплоізоляції біля периферії керна

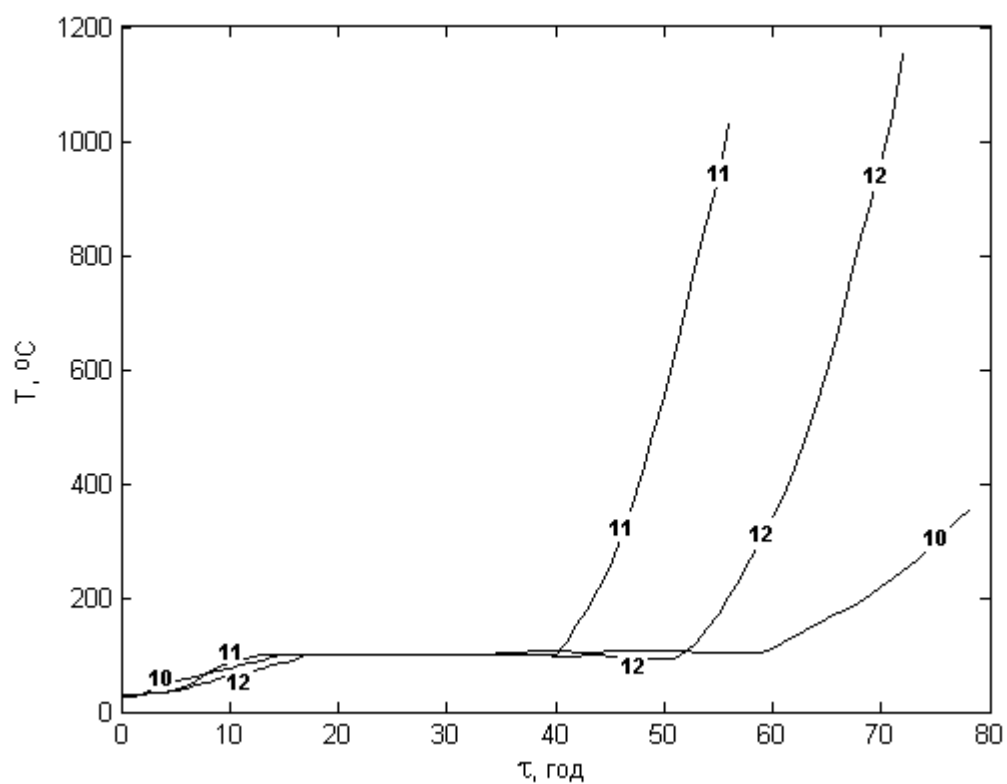


Рис. А.16. Динаміка температури подової теплоізоляції в перерізі № 2

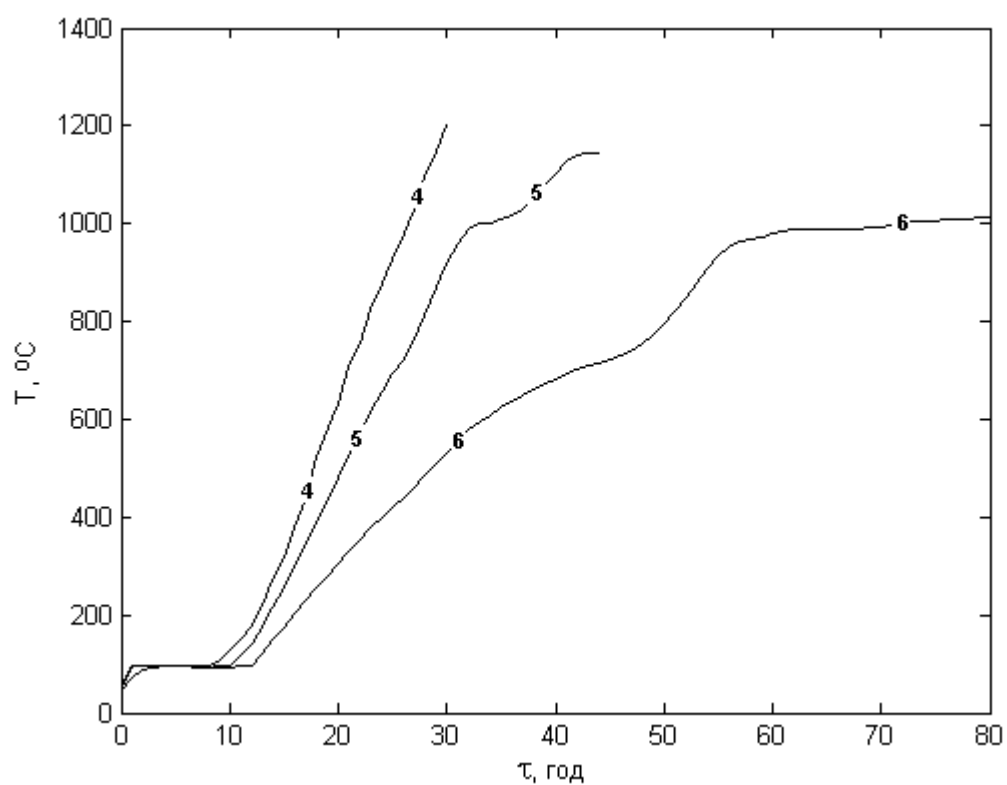


Рис. А.17. Динаміка температури верхньої теплоізоляції в перерізі № 1

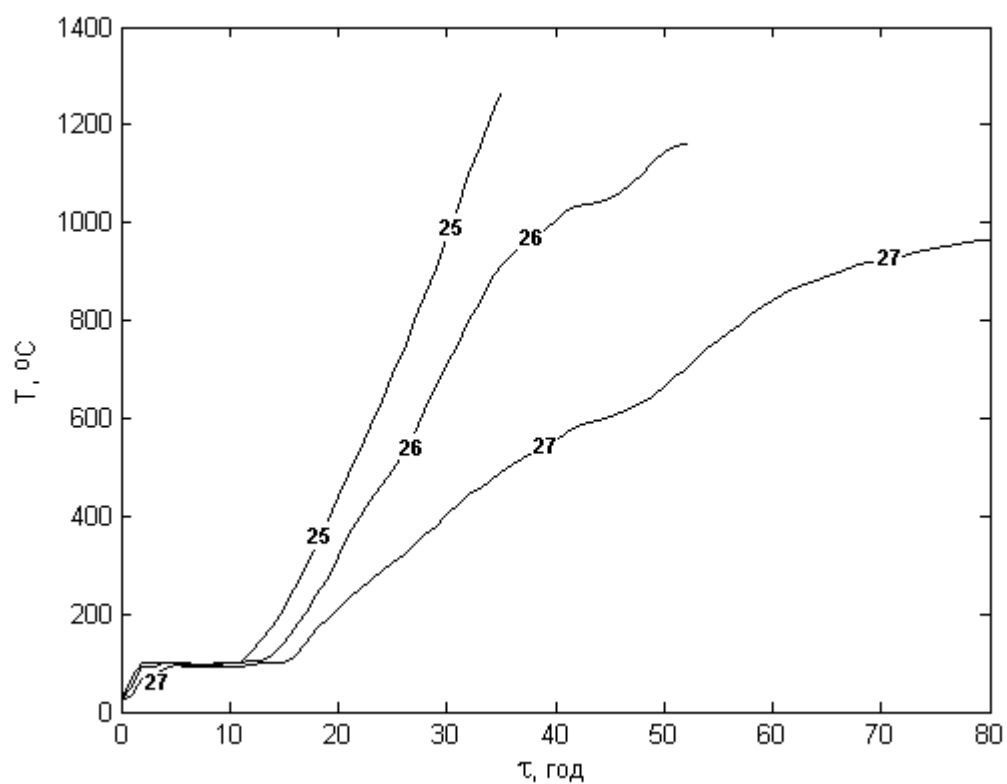


Рис. А.18. Динаміка температури верхньої теплоізоляції в перерізі № 3

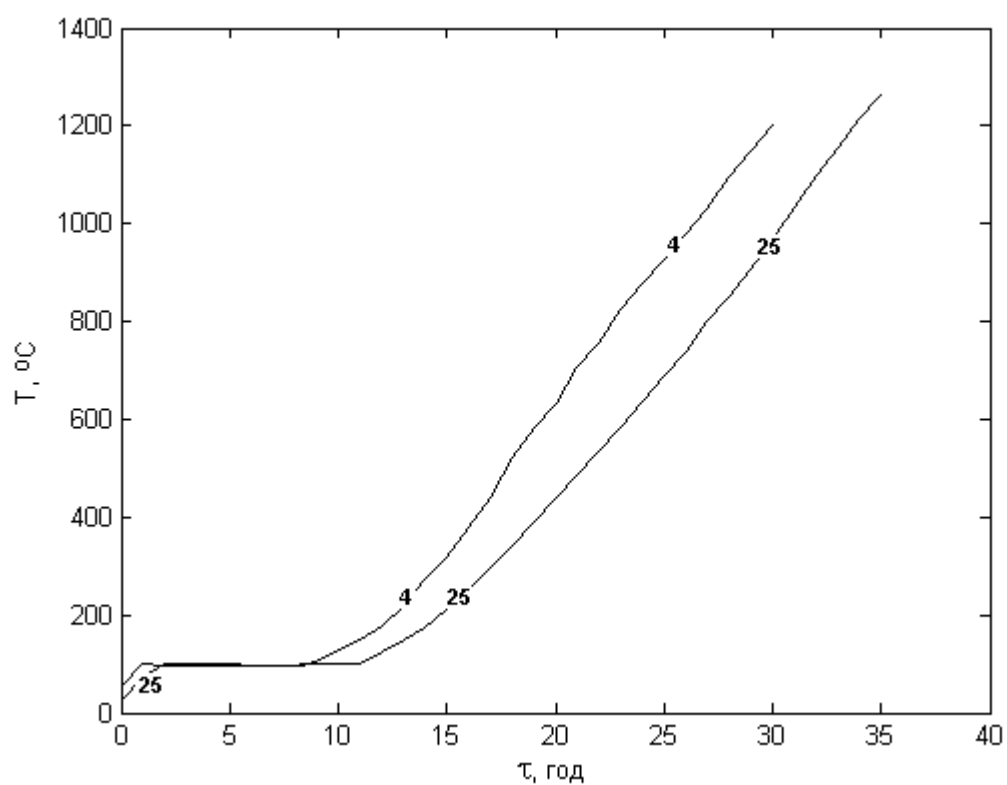


Рис. А.19. Динаміка температури верхньої теплоізоляції біля ядра в перерізах № 1 та № 3

Експериментальне дослідження кампанії графітації з форсованим регламентом

Заготовки	84×ЕГС550.
Схема пакетування	14×3×2
Корисна маса завантаження	74.3 т.
Тривалість кампанії	70 год 45 хв.
Загальний простій	1 год 25 хв.
Планова витрата енергії	430940 кВт·год.
Фактична витрата енергії	442675 кВт·год.
Питома витрата енергії	5957.9 кВт·год/т.

Схему розташування контрольних точок зображено на рис. 2.13 та 2.14.

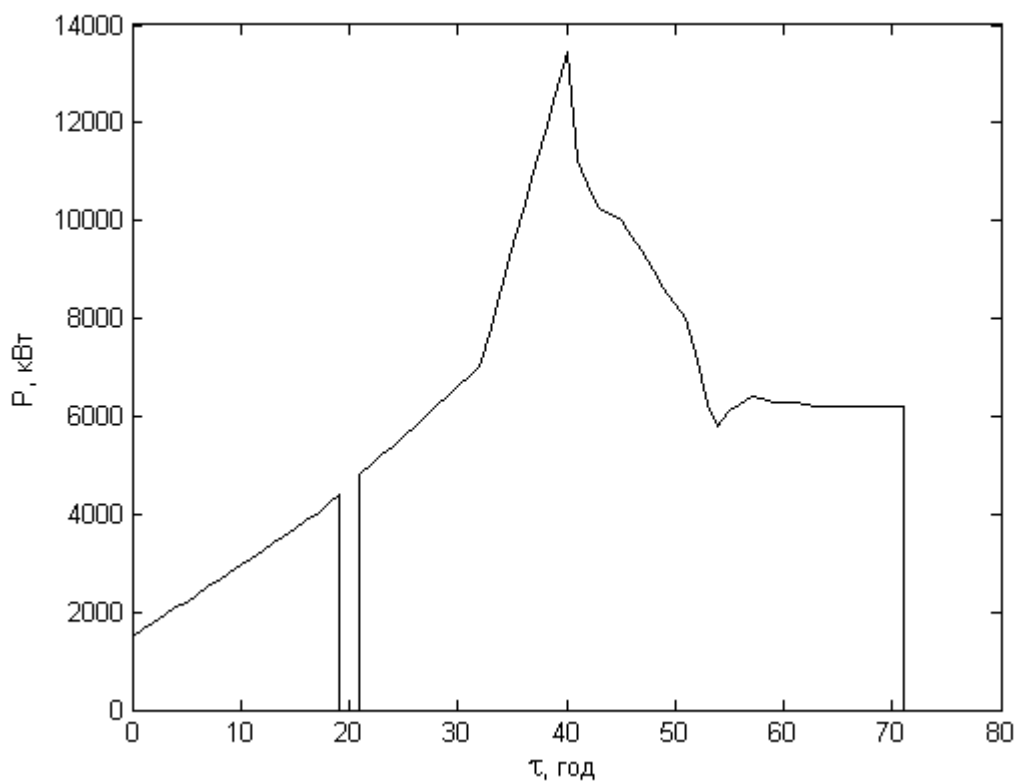


Рис. Б.1. Графік підведення потужності

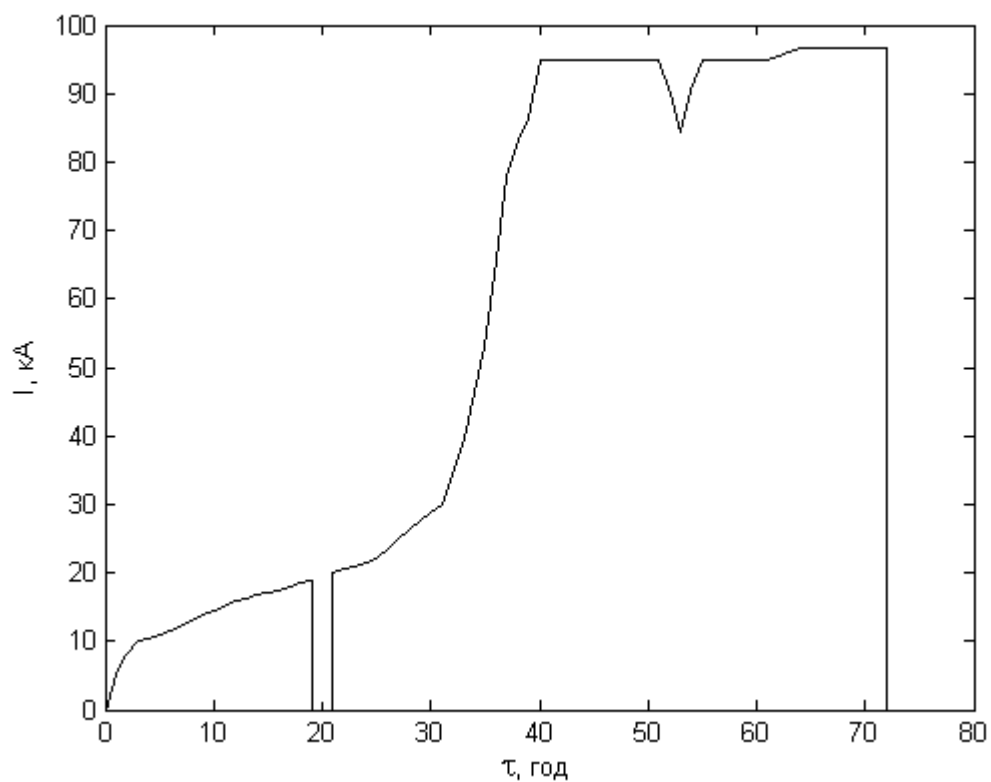


Рис. Б.2. Динаміка сили струму печі графітації

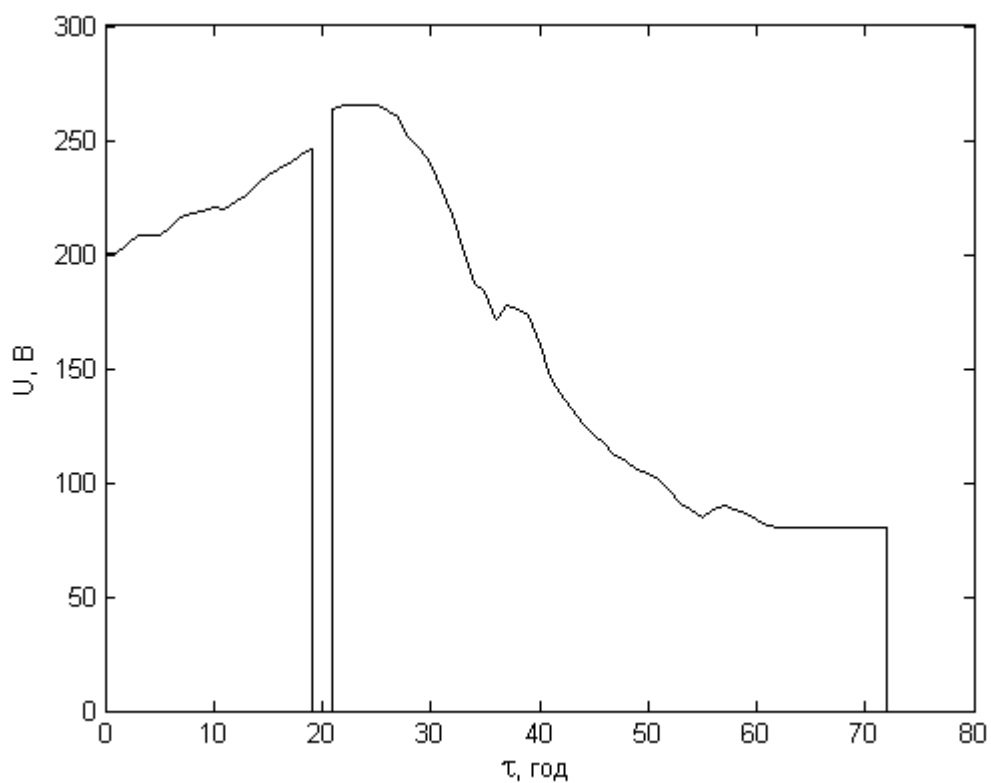


Рис. Б.3. Динаміка напруги печі графітації

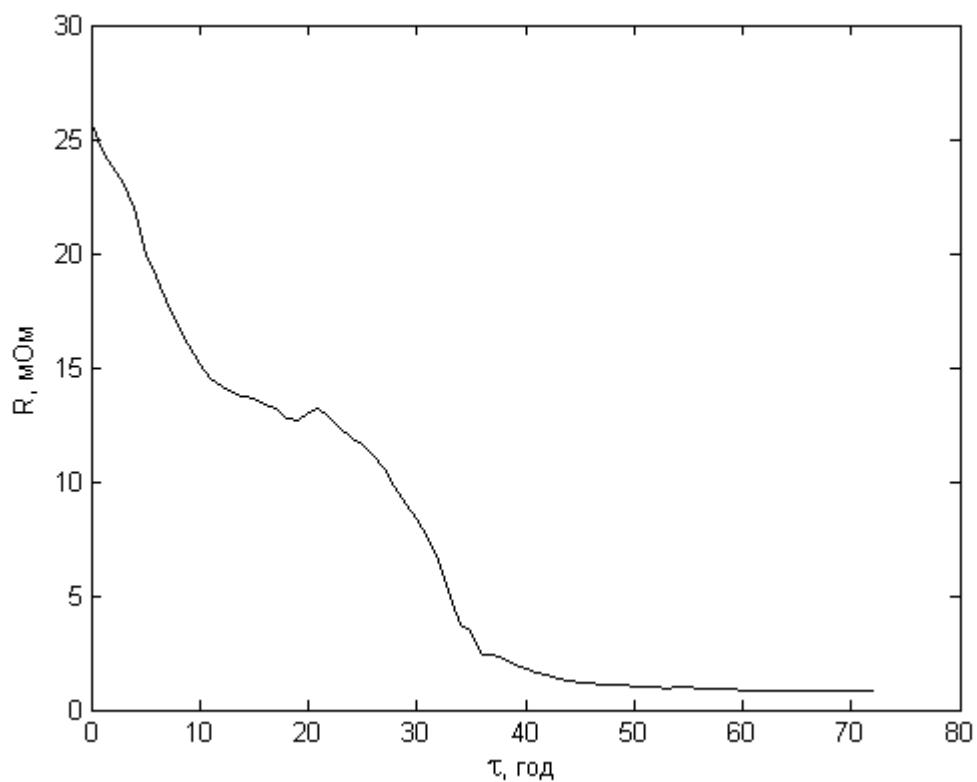


Рис. Б.4. Динаміка електричного опору печі графітації

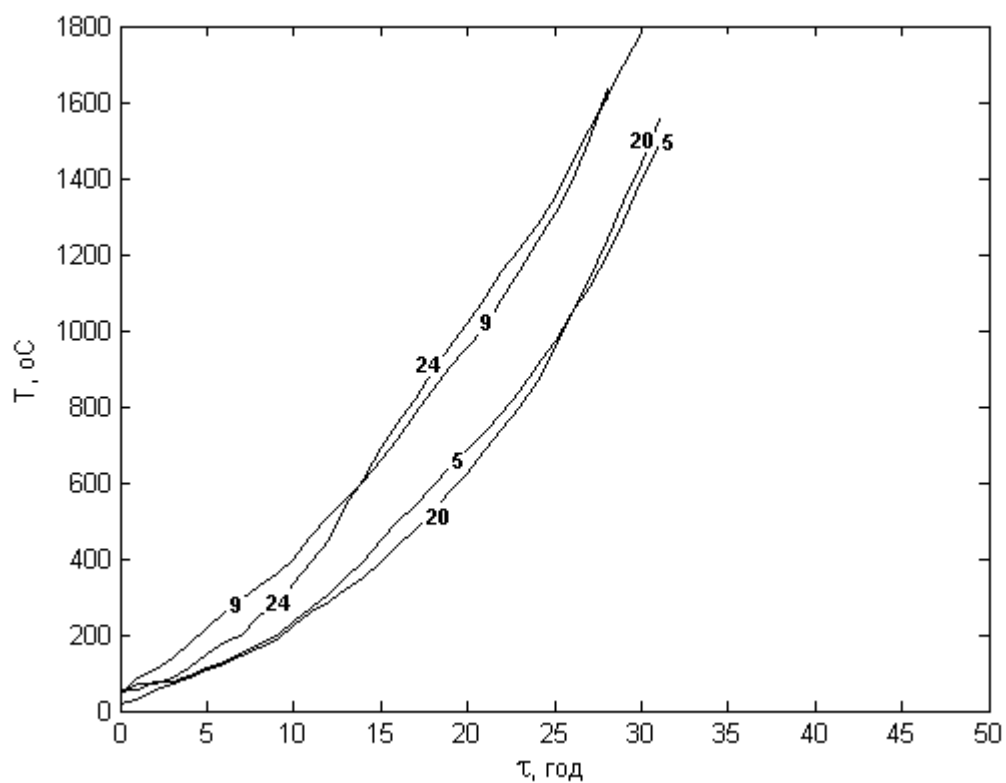


Рис. Б.5. Динаміка температури в заготовках та пересипці
верхнього та нижнього ряду (центр)

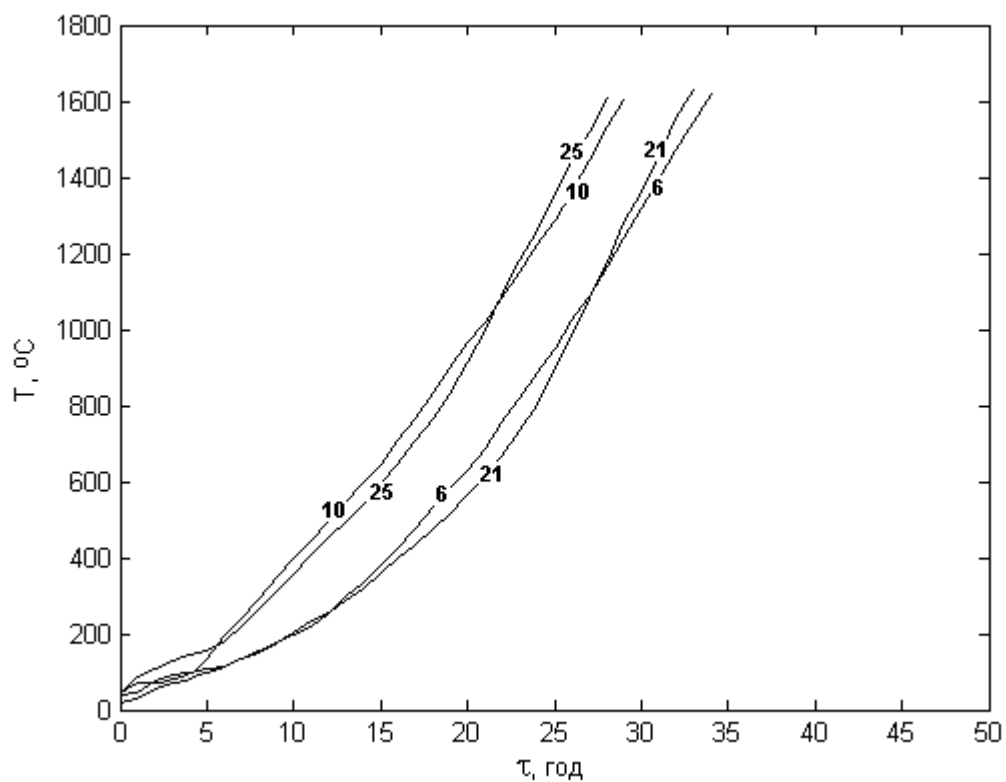


Рис. Б.6. Динаміка температури в заготовках та пересипці (300 мм від центру)

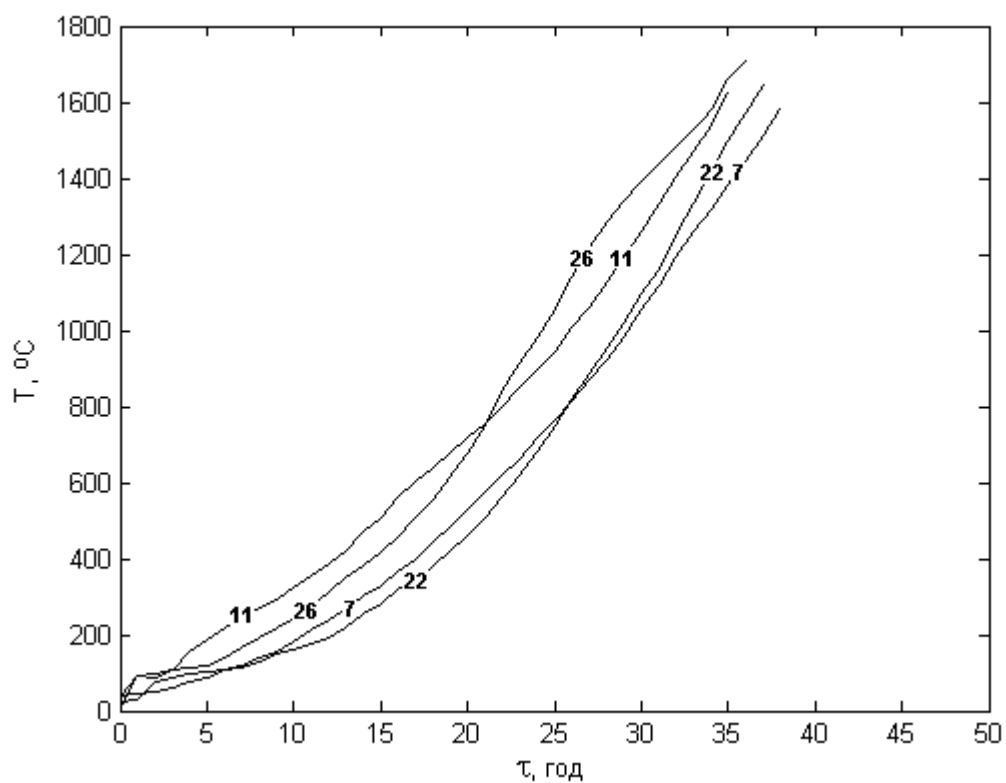


Рис. Б.7. Динаміка температури в заготовках та пересипці
верхнього та нижнього ряду (600 мм від центру)

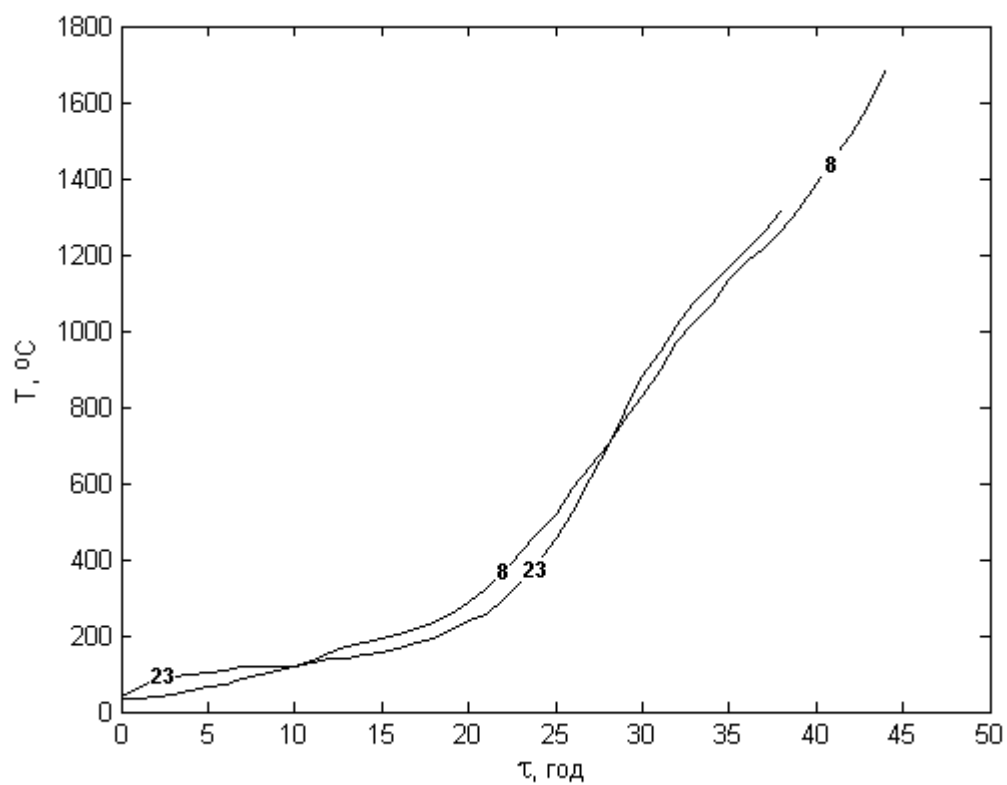


Рис. Б.8. Динаміка температури на периферії заготовок
верхнього та нижнього ряду

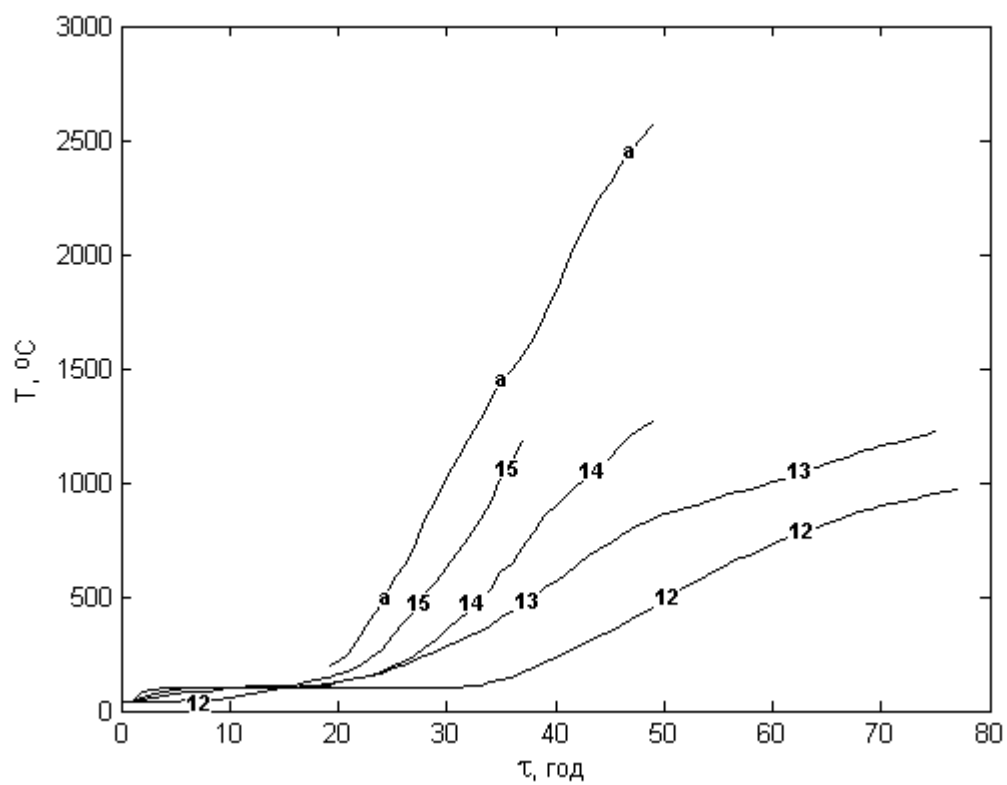


Рис. Б.9. Динаміка температури на периферії заготовки середнього ряду та вздовж
вимірювального тепловоду зі сторони “глухої” стіни

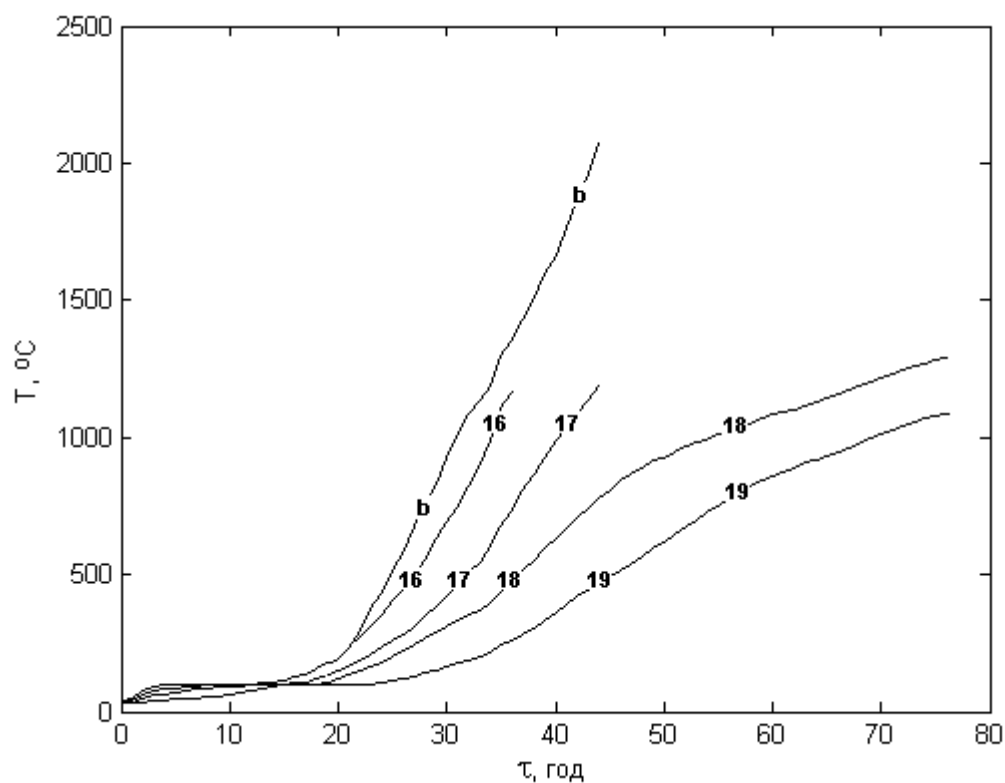


Рис. Б.10. Динаміка температури на периферії заготовки середнього ряду та вздовж вимірювального тепловоду зі сторони зовнішньої стіни

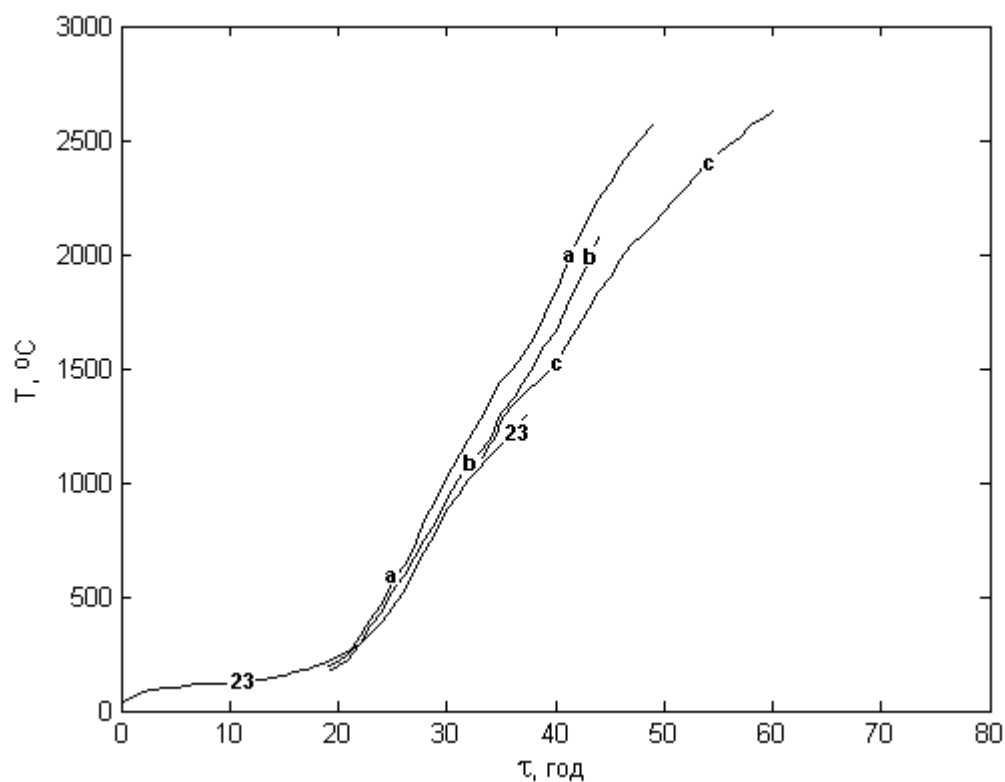


Рис. Б.11. Динаміка температури на периферії заготовок верхнього та середнього ряду

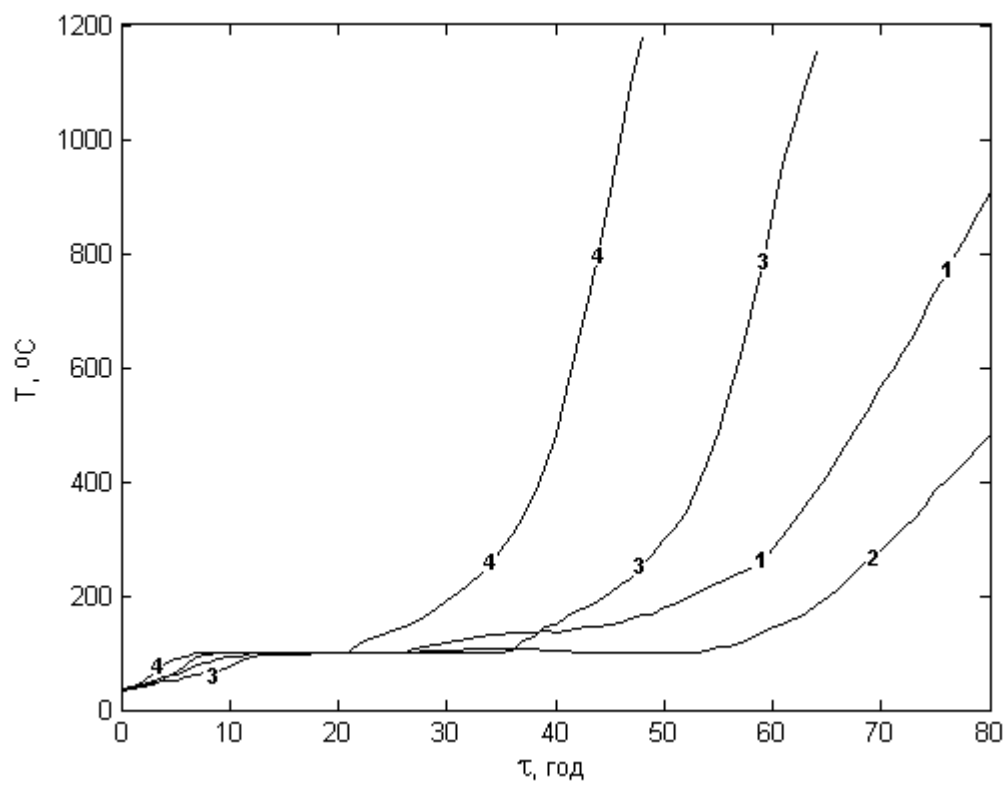


Рис. Б.12. Динаміка температури в подовій теплоізоляції

Додаток В

Електро- та теплофізичні властивості пічних матеріалів

Орієнтовні температурні залежності властивостей пічних матеріалів

Таблиця В.1

Матеріал	Темпе- ратура	Тепло- провідність	Питома масова теплоємність	Питомий електричний опір	Густина
	T	λ	c	ρ	γ
	°C	Вт/(м·K)	Дж/(кг·K)	мкОм·м	кг/м ³
(ез) обпалені електродні заготовки	0	10.4	680	35	8100
	500	10.9	1498	28	
	1000	11.4	1760	24	
	1500	12.4	1926	24	
	2000	15.8	2110	21	
	2500	22.1	2196	16	
	3000	29.1	2750	15	
	3400	30.0		15	
(пг) графітова- ний кокс (шунт)	0	21.3	800	7143	868
	500	21.2	1465	5395	
	1000	20.3	2240	2778	
	1500	20.1	2319	2201	
	2000	19.5	2393	1500	
	2500	18.2	2463	280	
	3000	17.9	2600	250	
	3500	17.1		240	
(пс) кернова пересипка (сирий кокс)	0	0.7	800	12000	868
	500	1.1	1465	6009	
	1000	1.6	2240	4130	
	1500	5.1	2319	2699	
	2000	9.2	2393	1680	
	2500	13.0	2463	765	
	3000	15.8	2600	250	
	3500	17.1		240	

Продовження таблиці В.1

	T	λ	c	ρ	γ
	°C	Вт/(м·K)	Дж/(кг·K)	мкОм·м	кг/м ³
(ті) тепло- ізоляційна шихта	0	0.5	800	280000	992
	500	1.1	1465	156800	
	1000	1.7	2240	97795	
	1500	3.6	2319	38790	
	2000	6.3	2393	19122	
	2500	9.9	2500	15365	
	3000	13.5		11610	
(ф) шамотна цегла	0	1.0	870		1900
	500	1.1	975		
	1000	1.2	1080		
	1500	1.3	1185		

Більшість наведених властивостей мають істотну нелінійну залежність від температури та можуть із задовільною точністю бути апроксимовані поліномом виду:

$$\varpi_{xx}(T) = T^6 \cdot a_6 + T^5 \cdot a_5 + T^4 \cdot a_4 + T^3 \cdot a_3 + T^2 \cdot a_2 + T \cdot a_1 + a_0; \quad (\text{В.1})$$

де ϖ_{xx} – відповідна властивість;

a_i – коефіцієнти апроксимації.

Для оцінки адекватності апроксимуючих залежностей задамося критерієм збігу [136, с. 91].

$$Y_{\text{fit}} = 100 \times \frac{1 - \|\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}\|}{\|\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}\|} ; \quad (\text{B.2})$$

де $\mathbf{y}$ – вектор даних температурної залежності деякої властивості $\bar{\omega}_{xx}$;

$\bar{\mathbf{y}}$ – середнє значення вектора $\mathbf{y}$;

$\hat{\mathbf{y}}$ – вектор апроксимуючої залежності.

Наприклад, на рис. В.1 зображено температурну залежність ПЕО кернової пересипки $\rho_{\text{пс}}$ та апроксимуючі залежності, представлені поліномами 2-го, 3-го та 5-го порядку. Коефіцієнти апроксимуючих поліномів розраховано методом найменших квадратів [135, с. 251].

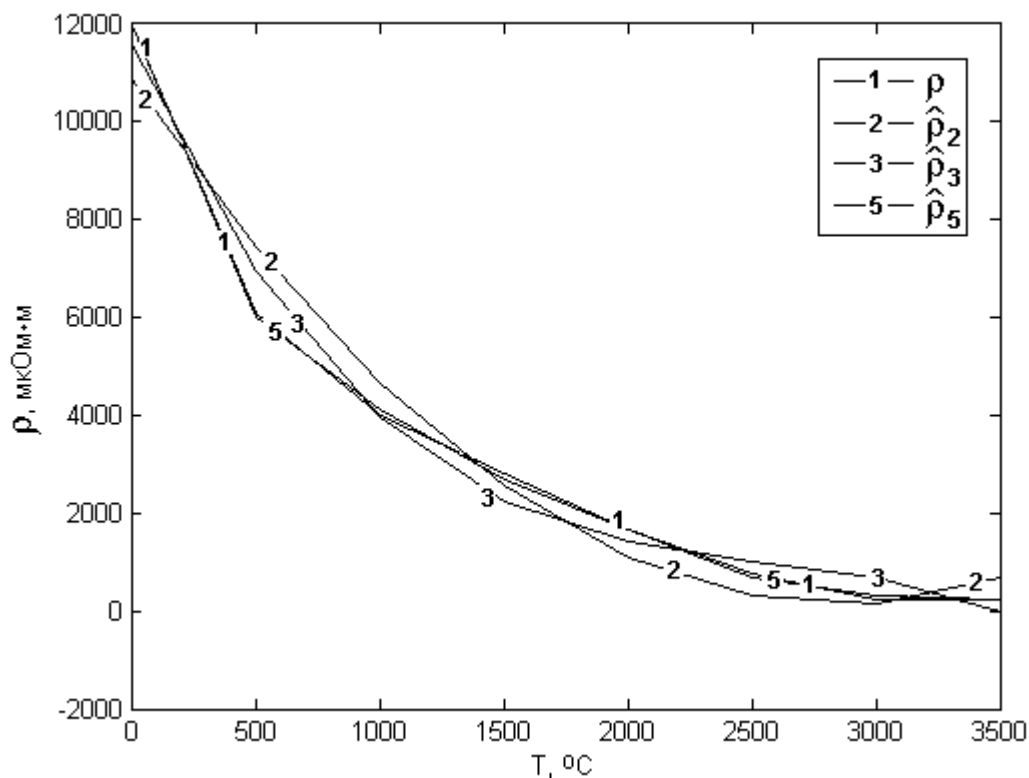


Рис. В.1. Температурна залежність ПЕО кернової пересипки

Для різних апроксимуючих залежностей $\hat{\rho}_{\text{пс}}$ відповідно до (В.2) визначено ступінь збігу з табличною функцією $\rho_{\text{пс}}$ (табл. В.2).

Як видно з табл. В.2, задовільну точність апроксимації (> 98 %) температурної залежності ПЕО кернової пересипки забезпечує поліном 5-го порядку.

Таблиця В.2

Порядок полінома	1	2	3	4	5	6	7
$Y_{\text{fit}}, \%$	49.55	79.76	87.76	94.91	98.02	98.96	99.99

За такою методикою апроксимовані інші, наведені в табл. В.1, температурні залежності пічних матеріалів. Отримані коефіцієнти апроксимації представлено в табл. В.3. Як видно з табл. В.3, задовільну точність апроксимації властивостей матеріалів керна забезпечують поліноми 5 .. 6 степеня.

Коефіцієнти апроксимації властивостей пічних матеріалів

Таблиця В.3

$T, ^\circ\text{C}$	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
1	2	3	4	5	6	7	8
(ез) обпалені електродні заготовки							
$\lambda_{\text{ез}}(T)$	0	-5.8101×10^{-16}	3.6643×10^{-12}	-6.5329×10^{-9}	4.3773×10^{-6}	9.9729×10^{-6}	10.445
$c_{\text{ез}}(T)$	0	1.3669×10^{-13}	-1.0341×10^{-9}	2.9577×10^{-6}	-4.0441×10^{-3}	3.052	679.14
$\rho_{\text{ез}}(T)$	-1.4528×10^{-18}	1.4838×10^{-14}	-5.5577×10^{-11}	9.143×10^{-8}	-5.8781×10^{-5}	-1.4257×10^{-3}	35.002
(пг) графітований кокс							
$\lambda_{\text{пг}}(T)$	-4.0822×10^{-19}	4.2454×10^{-15}	-1.6592×10^{-11}	2.9984×10^{-8}	-2.4712×10^{-5}	6.4368×10^{-3}	21.298
$c_{\text{пг}}(T)$	2.6188×10^{-16}	-2.5473×10^{-12}	9.4788×10^{-9}	-1.6537×10^{-5}	1.2706×10^{-2}	-1.9226	800
$\rho_{\text{пг}}(T)$	0	9.5693×10^{-13}	-7.1808×10^{-9}	1.8651×10^{-5}	-1.8549×10^{-2}	1.8547	7150

Продовження таблиці В.3

1	2	3	4	5	6	7	8
(пс) сирий кокс							
$\lambda_{\text{пс}}(T)$	0	3.2821×10^{-16}	-3.0263×10^{-12}	8.8077×10^{-9}	-7.1033×10^{-6}	2.1546×10^{-3}	0.7285
$c_{\text{пс}}(T)$	2.6227×10^{-16}	-2.5503×10^{-12}	9.4879×10^{-9}	-1.6549×10^{-5}	1.2714×10^{-2}	-1.9244	800
$\rho_{\text{пс}}(T)$	0	-2.2926×10^{-13}	2.446×10^{-9}	-9.7372×10^{-6}	1.8373×10^{-2}	-18.855	11986
(ті) теплоізоляційна шихта							
$\lambda_{\text{ті}}(T)$	0	0	0	-8.9355×10^{-11}	1.8975×10^{-6}	-5.6032×10^{-4}	0.61126
$c_{\text{ті}}(T)$	0	0	0	1.2504×10^{-7}	-8.6846×10^{-4}	2.0765	761.33
$\rho_{\text{ті}}(T)$	0	0	0	-1.0729×10^{-5}	9.3622×10^{-2}	-273	2.7822×10^5
(ф) шамотна цегла							
$\lambda_{\text{ф}}(T)$	0	0	0	0	0	1.5×10^{-4}	1.04
$c_{\text{ф}}(T)$	0	0	0	0	0	0.21	870

Моделювання температурного поля при ординарному регламенті

Розрахунок температурного поля $T_{ma1}(x, y, z, \tau)$ здійснено для керуючого впливу $U_{e1}(\tau)$, що зображено на рис. Д.1. Пік потужності досягнуто на 52 год. Піч вимкнено на 78 год.

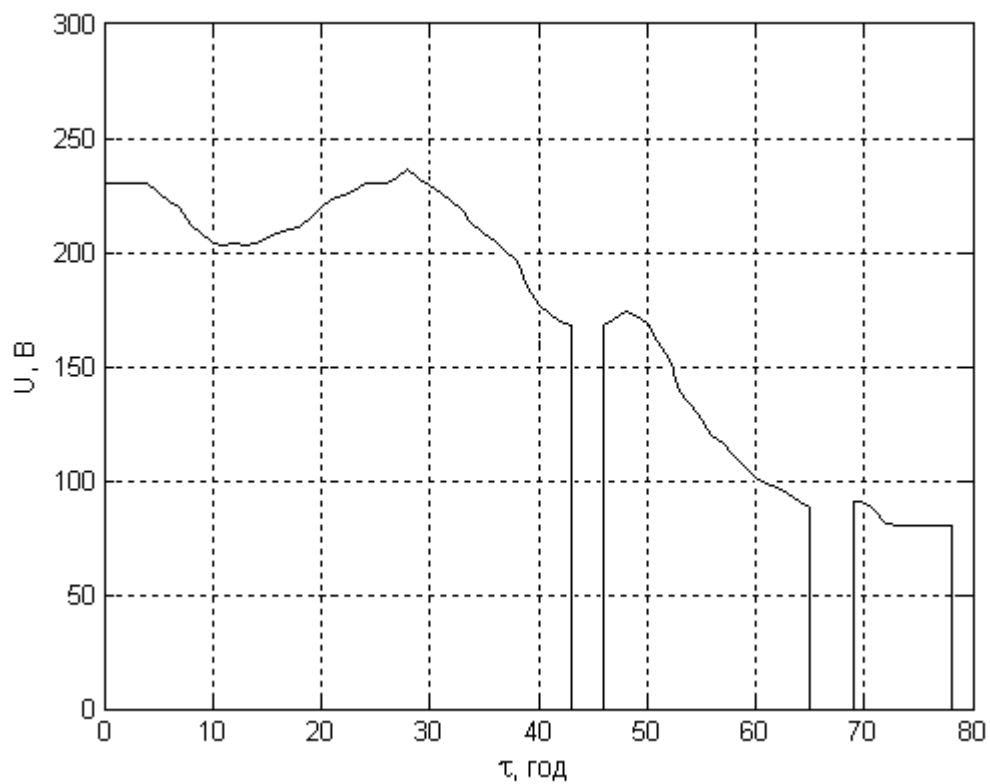


Рис. Д.1. Динаміка напруги печі графітації в кампанії з ординарним регламентом

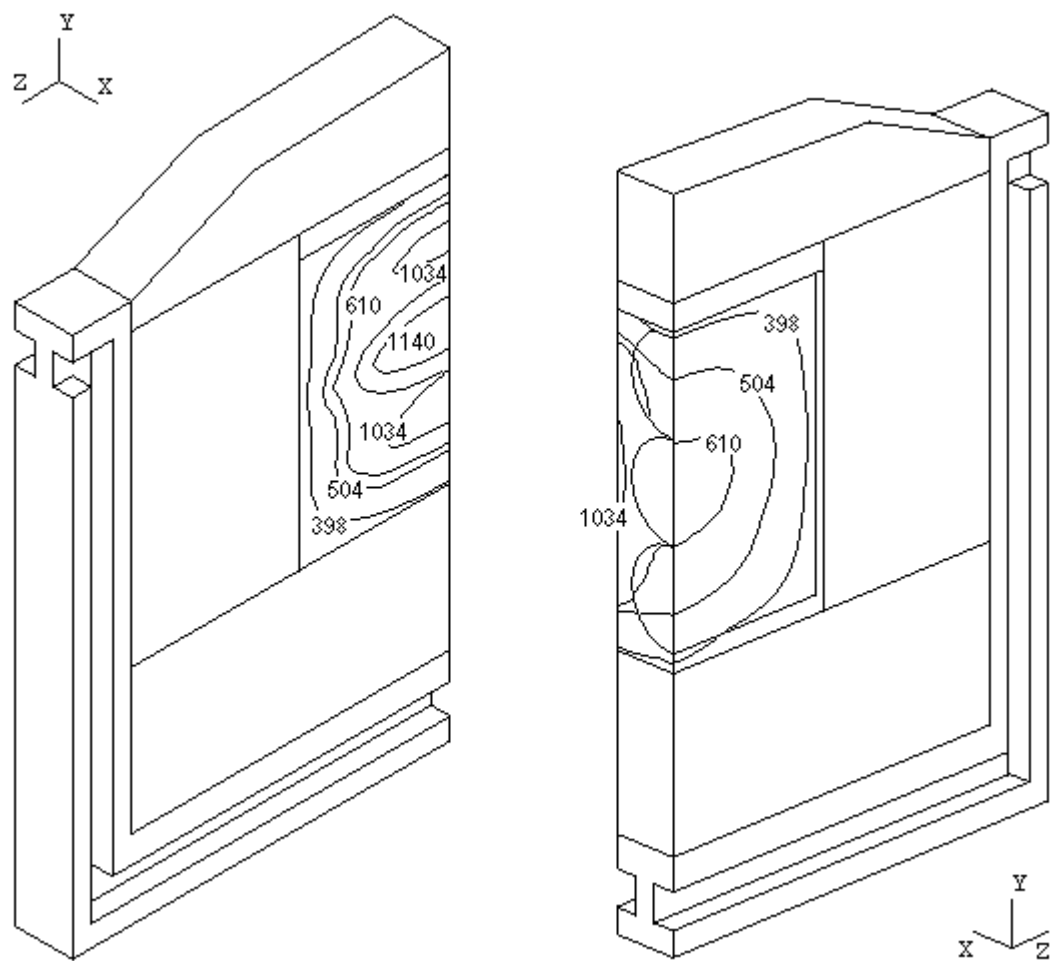


Рис. Д.2. Температурне поле РФ печі на 10-й годині кампанії

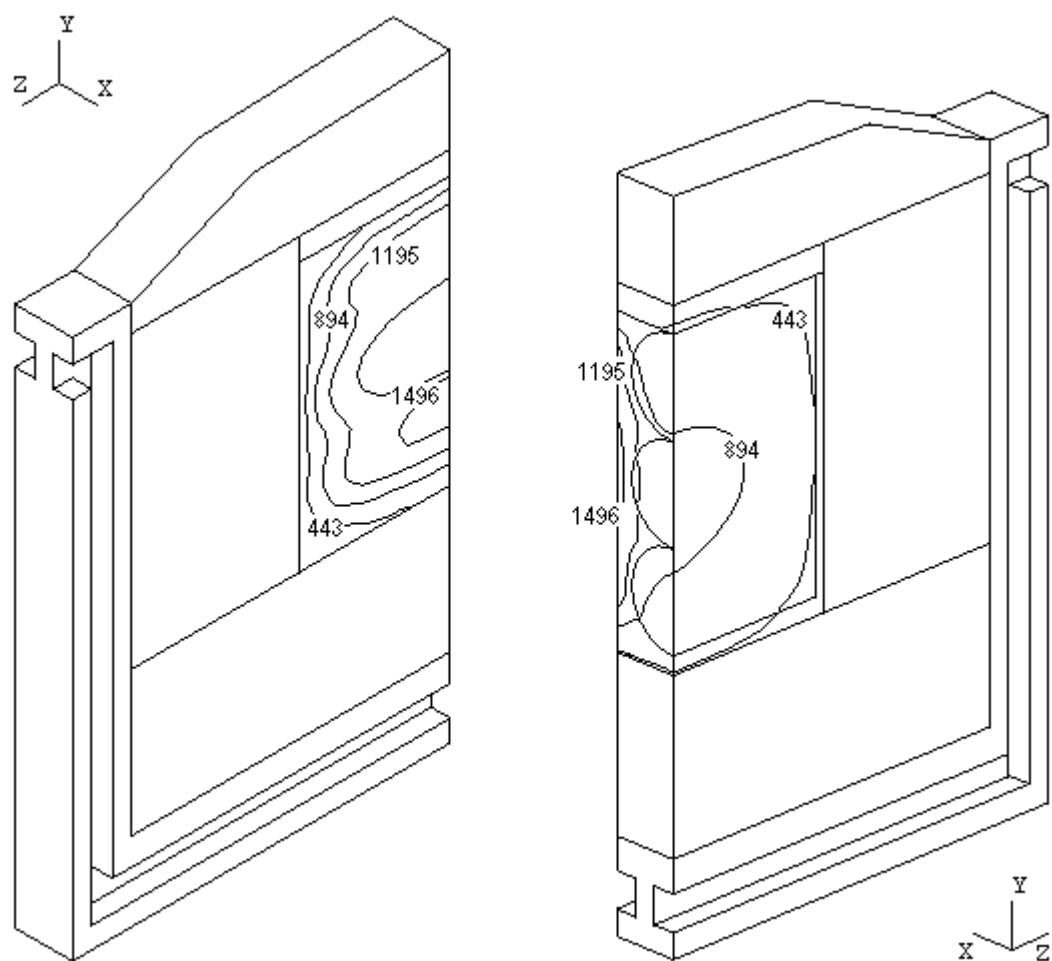


Рис. Д.3. Температурне поле РФ печі на 20-й годині кампанії

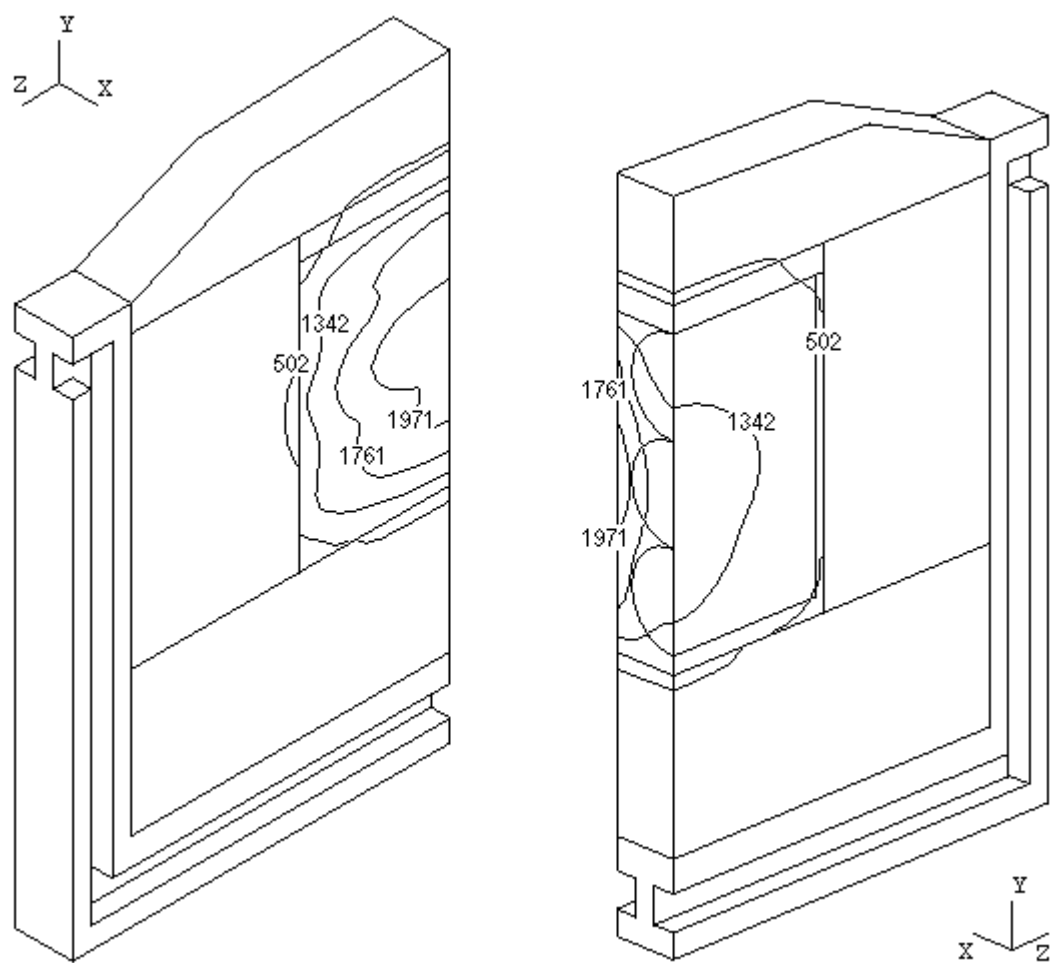


Рис. Д.4. Температурне поле РФ печі на 30-й годині кампанії

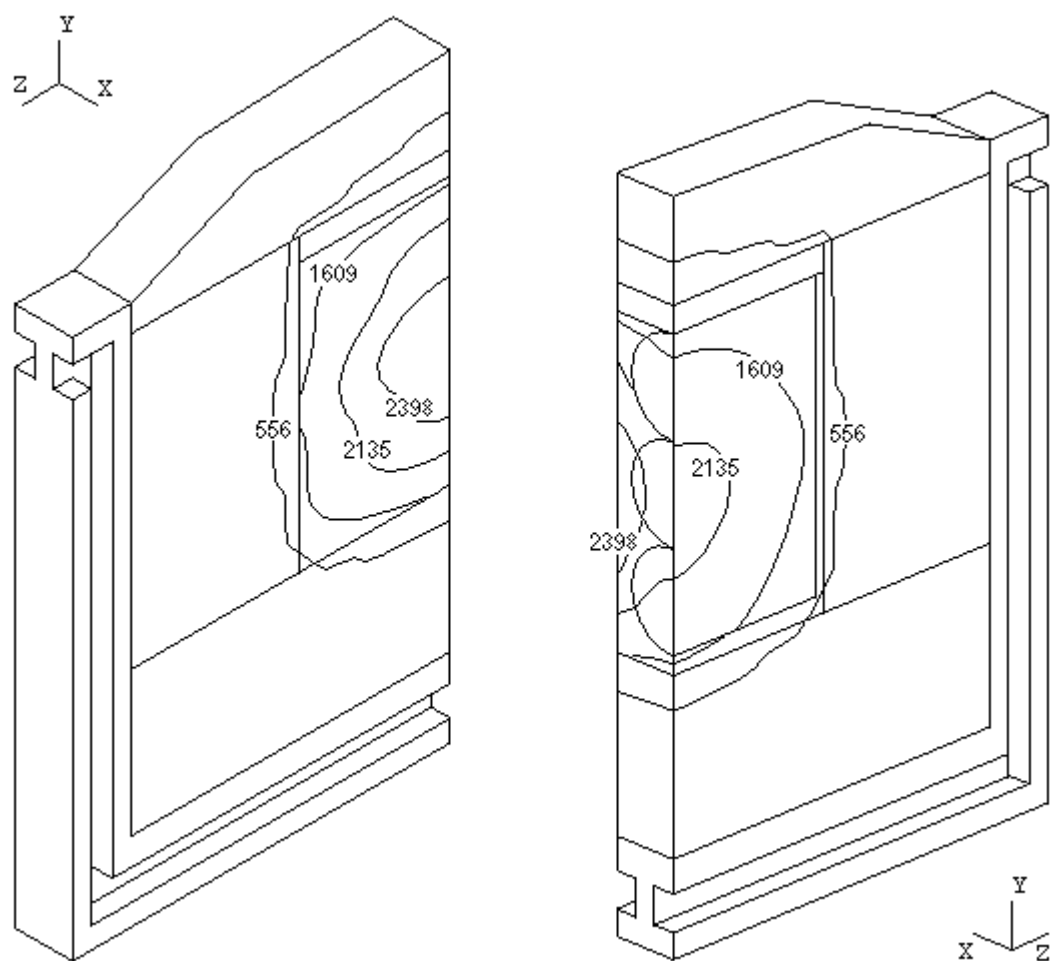


Рис. Д.5. Температурне поле РФ печі на 40-й годині кампанії

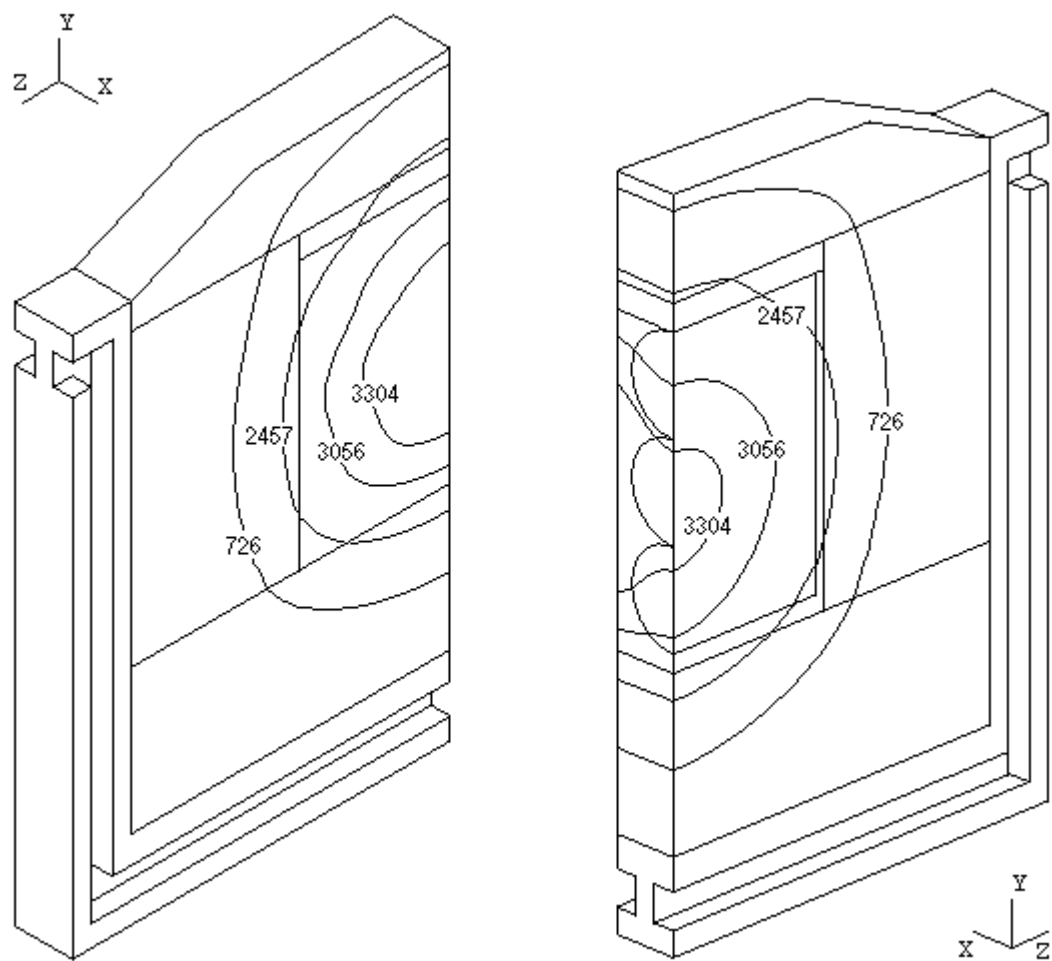


Рис. Д.6. Температурне поле РФ печі на 60-й годині кампанії

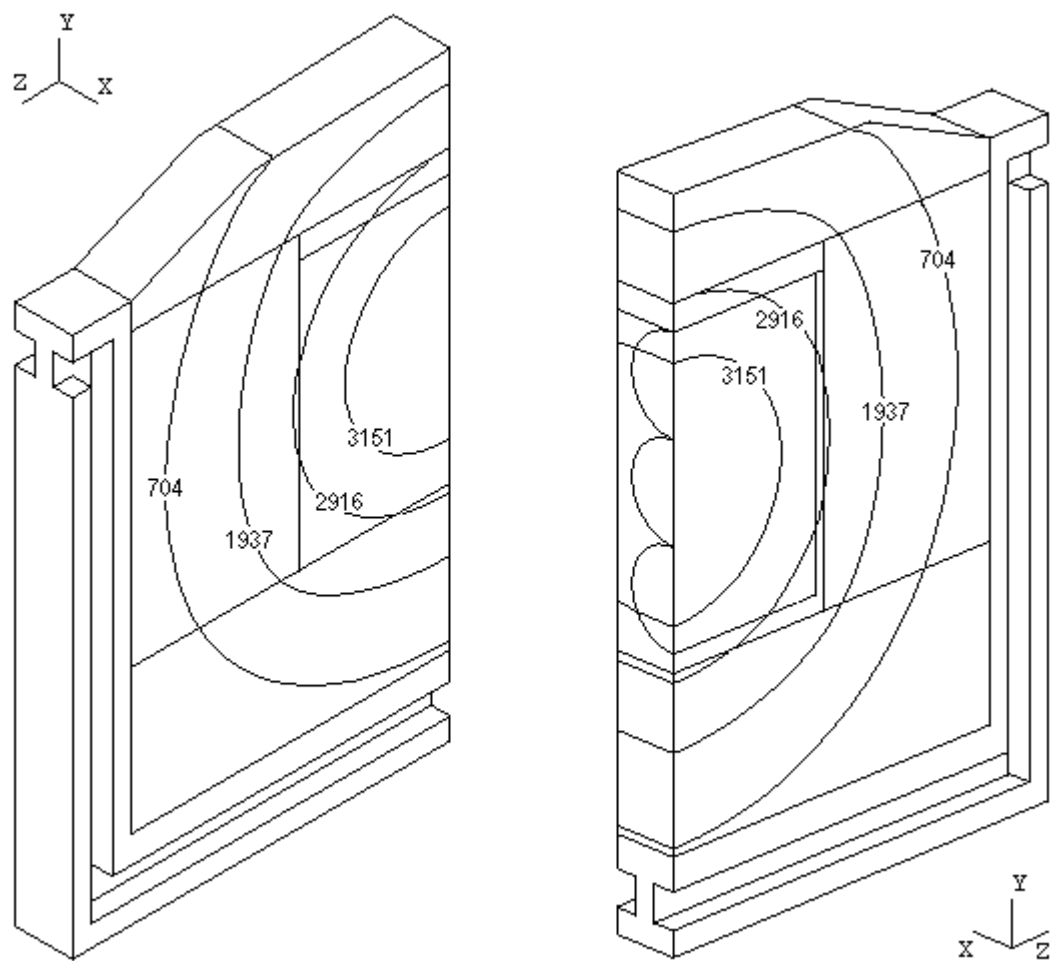


Рис. Д.7. Температурне поле РФ печі на 80-й годині кампанії,
2-й годині охолодження

Моделювання температурного поля при оптимальному керуванні

Розрахунок температурного поля $T_{\text{opt}}(x, y, z, \tau)$ здійснено для керуючого впливу $U_{\text{opt}}(\tau)$, що зображено на рис. Е.1. Пік потужності досягнуто на 19 та 22 год. Піч вимкнено на 33 год.

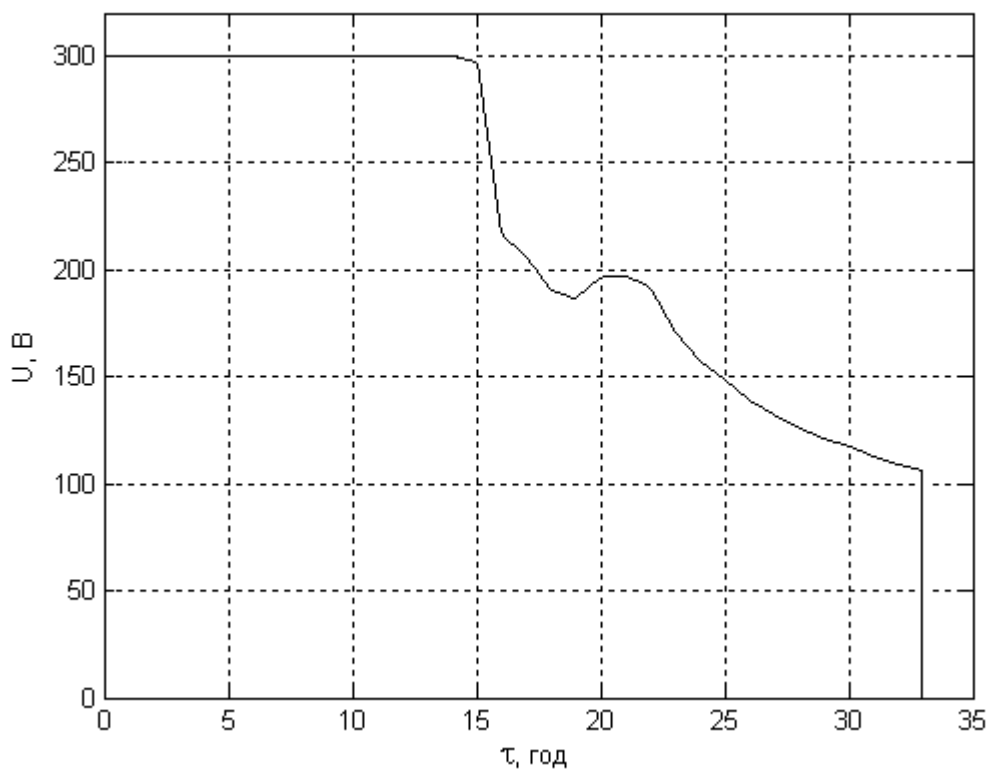


Рис. Е.1. Динаміка напруги печі при роботі в оптимальному режимі

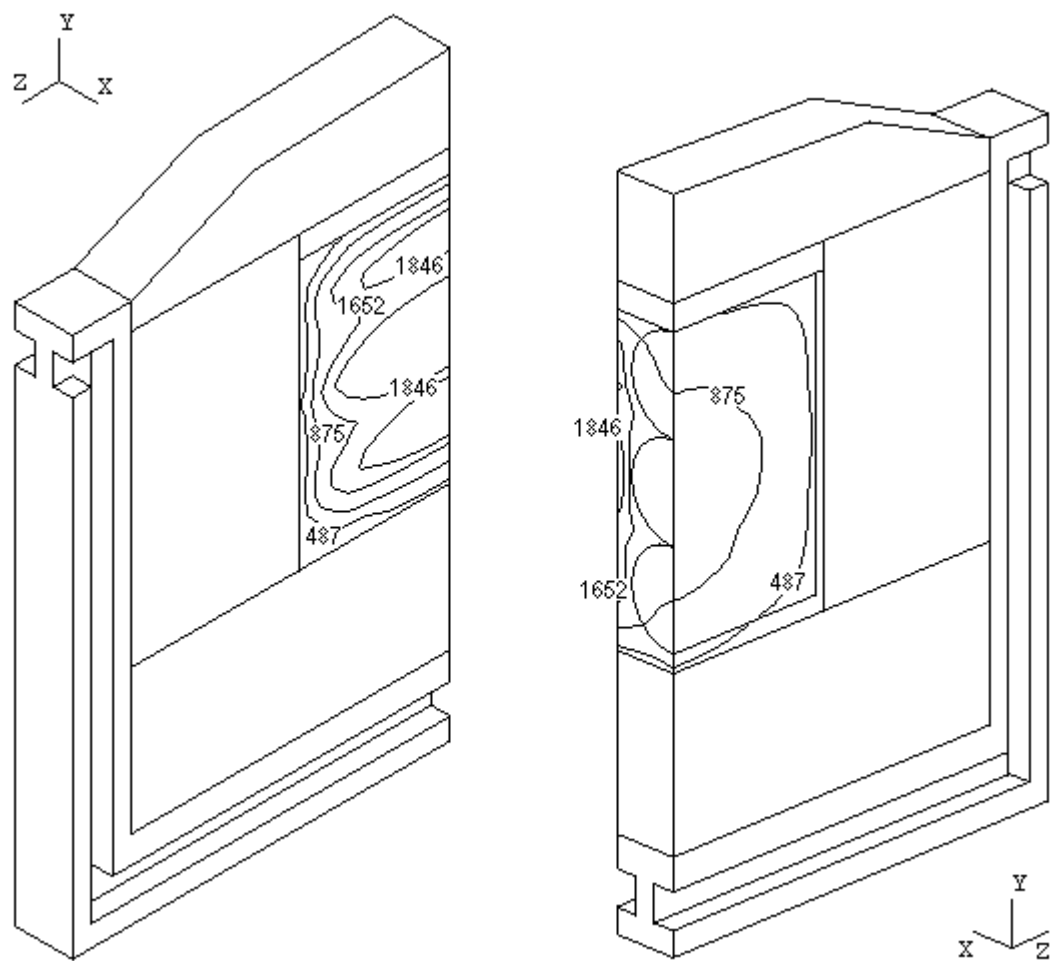


Рис. Е.2. Температурне поле РФ печі на 10-й годині кампанії

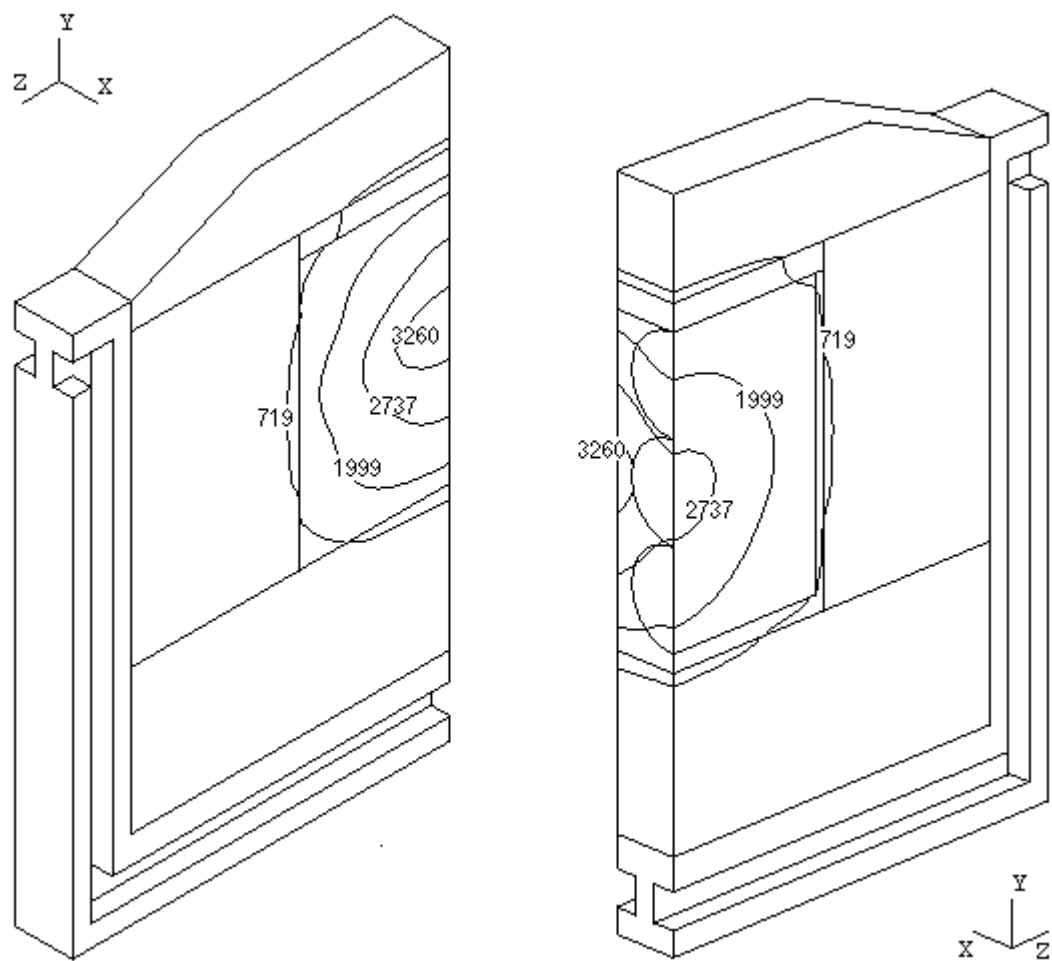


Рис. Е.3. Температурне поле РФ печі на 20-й годині кампанії

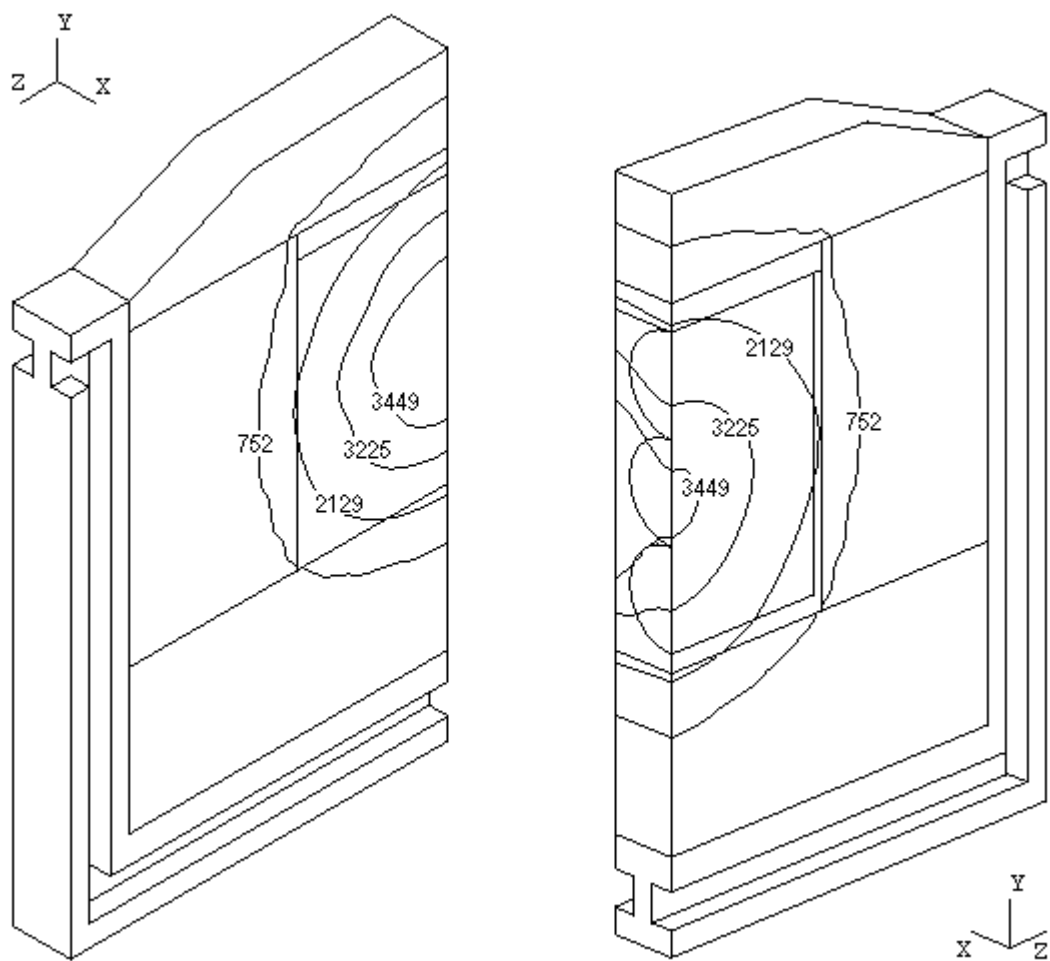


Рис. Е.4. Температурне поле РФ печі на 30-й годині кампанії

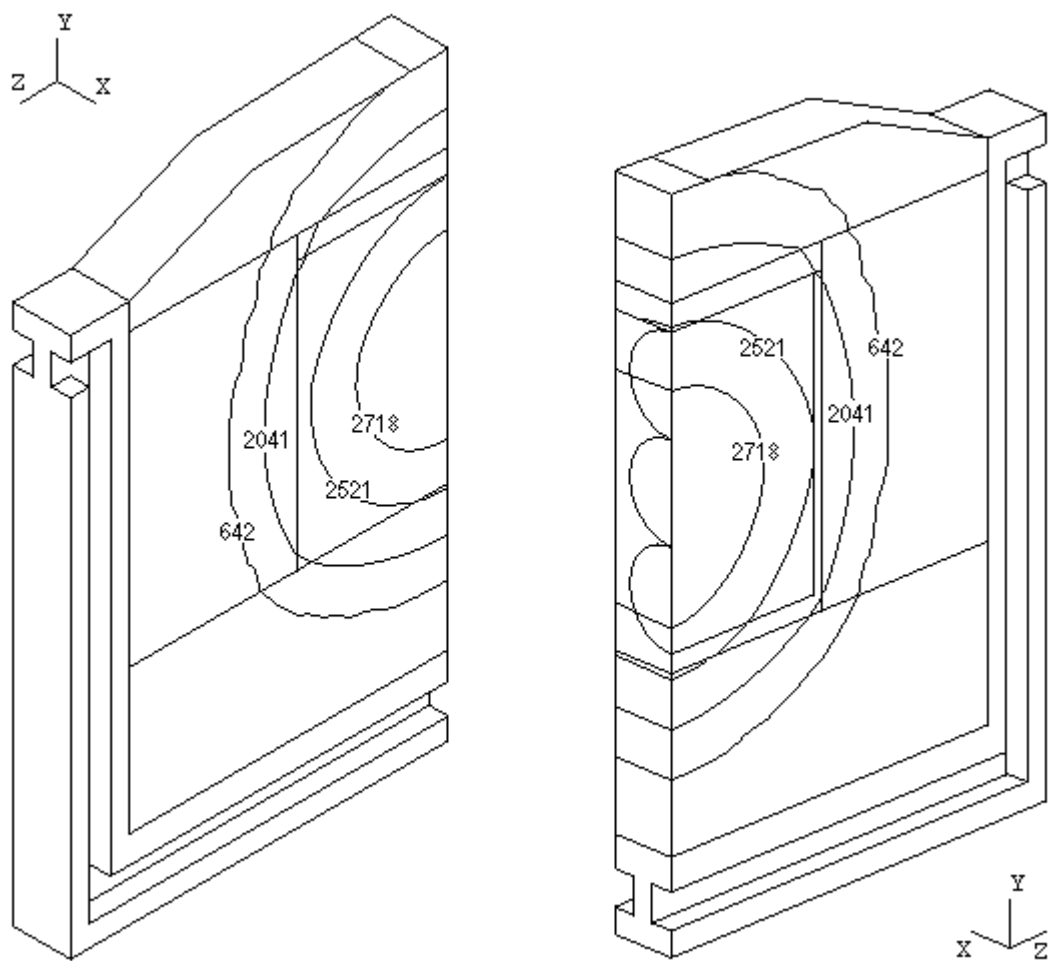


Рис. Е.5. Температурне поле РФ печі на 40-й годині кампанії,
7-й годині охолодження

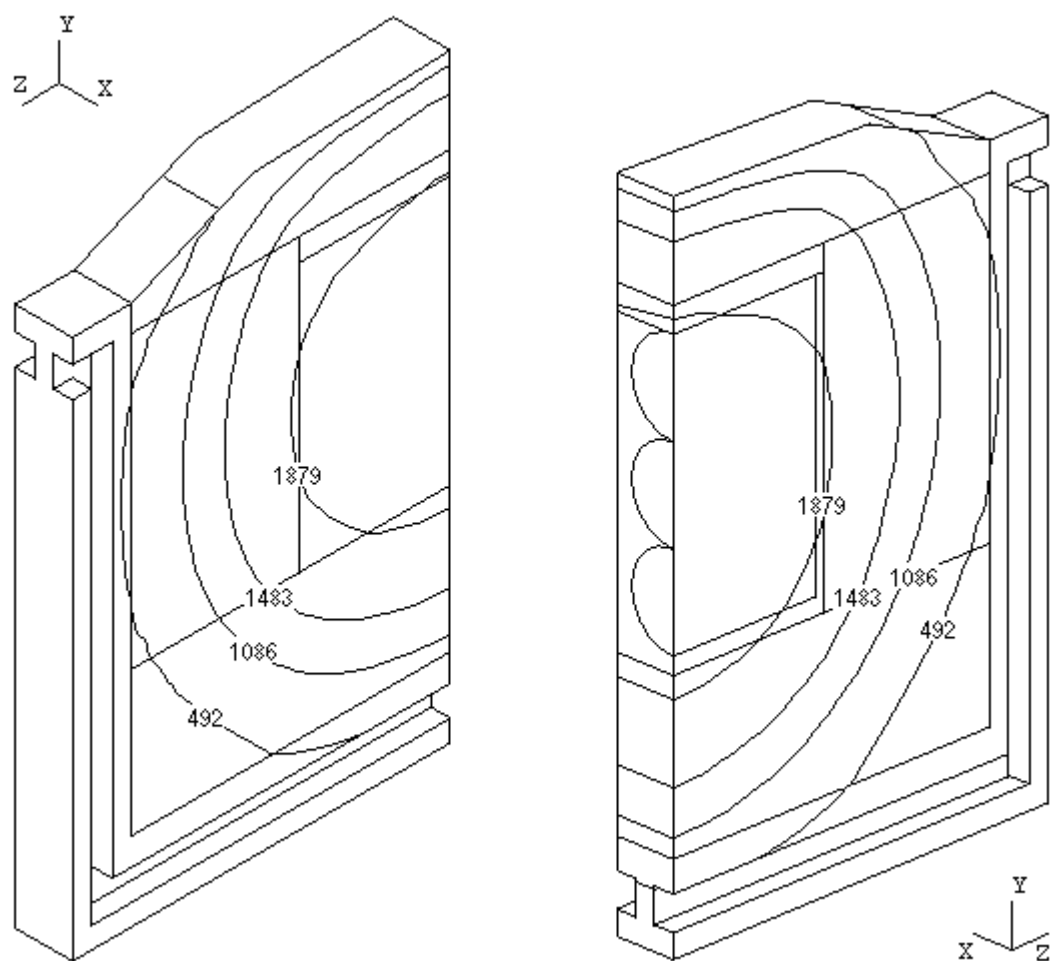


Рис. Е.6. Температурне поле РФ печі на 100-й годині кампанії,
67-й годині охолодження

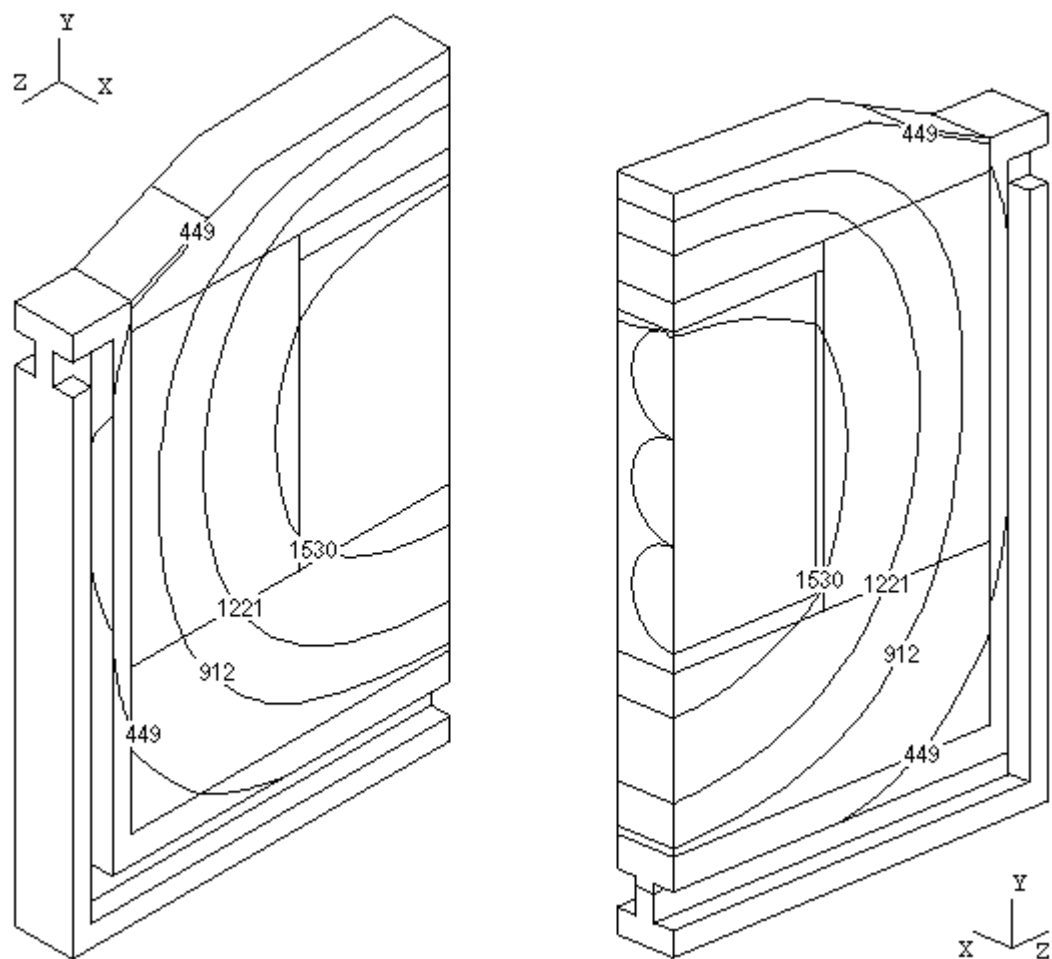


Рис. Е.7. Температурне поле РФ печі на 170-й годині кампанії,
137-й годині охолодження

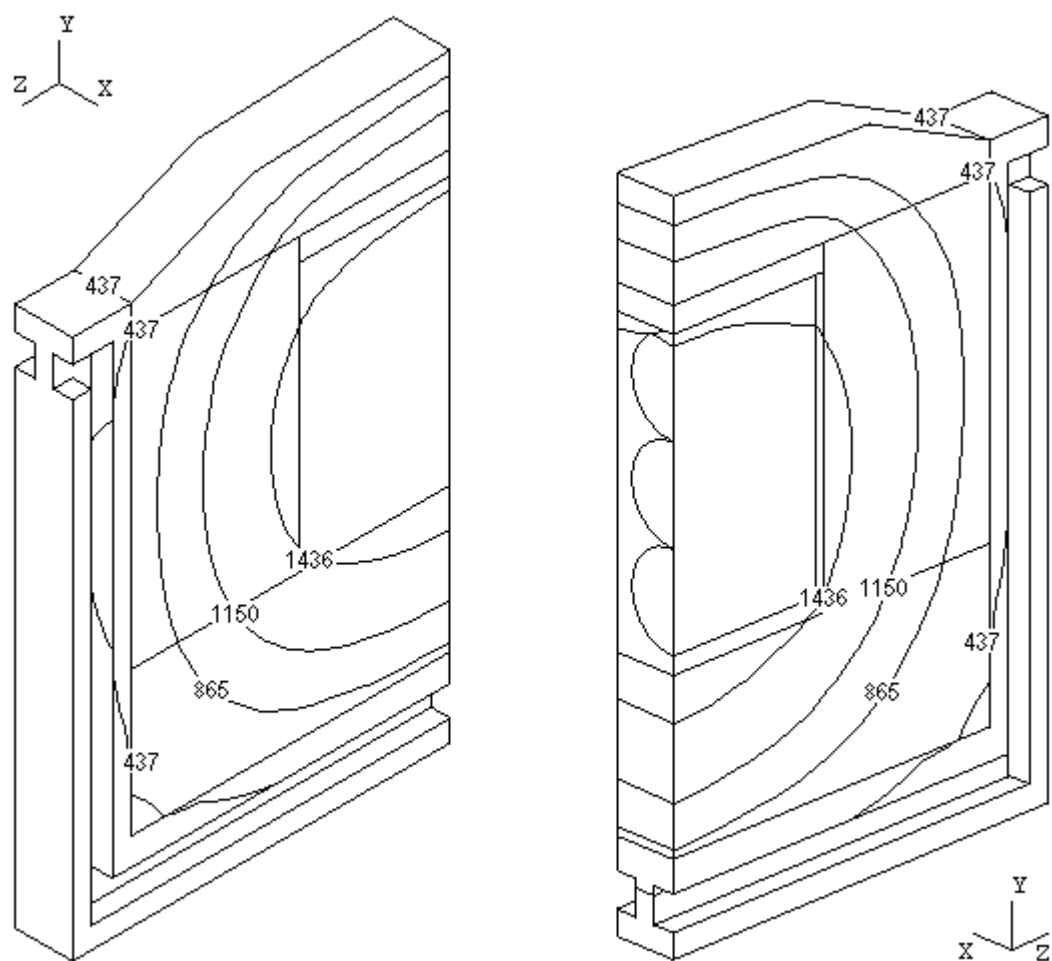


Рис. Е.8. Температурне поле РФ печі на 200-й годині кампанії,
167-й годині охолодження

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Знамеровский В.Ю. Математическое моделирование процесса графитации / В.Ю. Знамеровский. – М. : Metallurgy, 1994. – 176 с.
2. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов / С.В. Шулепов. – М. : Metallurgy, 1972. – 256 с.
3. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых. – М. : Metallurgy, 1987. – 176 с.
4. Графит как высокотемпературный материал / Сб. ст. ; Пер. с англ. – М. : Мир, 1964. – 424 с.
5. Черненко И.И. Расчет термонапряжений в трехслойном цилиндре из графитового материала с учетом специфических свойств внутреннего слоя / И.И. Черненко, В.И. Артемьев // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1972. – Вып. 7. – С. 146–157.
6. Темкин И.В. Производство электродных изделий / И.В. Темкин. – М. : Высш. школа, 1980. – 248 с.
7. Сорлье М. Катоде в алюминиевом электролизере / М. Сорлье, Х.А. Ойя. – Красноярск : КГУ, 1997. – 460 с.
8. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е.Ф. Чалых. – М. : Metallurgy, 1972. – 438 с.
9. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А.С. Фиалков. – М. : Аспект Пресс, 1997. – 718 с.
10. Санников А.К. Производство электродной продукции / А.К. Санников, А.Б. Сомов, В.В. Ключников [и др.] – М. : Metallurgy, 1985. – 129 с.
11. Островский В.С. Искусственный графит / В.С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков. – М. : Metallurgy, 1986. – 272 с.
12. Фиалков А.С. Углеграфитовые материалы / А.С. Фиалков. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.
13. Чичулин Н.И. О режимах графитации электродных изделий / Н.И. Чичулин, Б.И. Давыдович // Совершенствование технологии и улучшение качества

- электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. – Вып. 5. – С. 114–121.
14. Белов Г.В. Технический контроль качества изделий из углеродных материалов / Г.В. Белов. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 92 с.
 15. Белов Г.В. Метрологическое обеспечение качества углеродных материалов / Г.В. Белов. – М. : Metallurgy, 1992. – 256 с.
 16. Чалых Е.Ф. Обжиг электродов / Е.Ф. Чалых – М. : Metallurgy, 1981. – 116 с.
 17. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов / Е.Ф. Чалых. – М. : Metallurgy, 1990. – 238 с.
 18. Карзунова Р.В. Влияние способа прессования на свойства графита / Р.В. Карзунова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. – Вып. 5. – С. 71–91.
 19. Плевин Г.В. Улучшение качественных показателей электродов диаметра 555 мм / Г.В. Плевин, О.Н. Тиняков, Н.А. Борисова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1976. – Вып. 8. – С. 96–102.
 20. Данцис Я.Б. Электротермические процессы химической технологии / Я.Б. Данцис, В.А. Ершов, Г.М. Жилов [и др.] – Л. : Химия, 1984. – 464 с.
 21. Доржиев М.Н. Производительность установок графитации с различными схемами электроснабжения / М.Н. Доржиев, Н.И. Чичулин, Л.А. Кралин [и др.] // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1974. – Вып. 6. – С. 167–171.
 22. Метелица Я.В. Новые источники питания электропечных установок графитации / Я.В. Метелица, Ю.Г. Юргенс // Технологические процессы и оборудование электродного производства : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, ГосНИИЭП, 1989. – С. 64–70.
 23. Волков Ю.К. О рациональной схеме источника питания печей графитации на постоянном токе / Ю.К. Волков, М.В. Гельман, М.Н. Доржиев [и др.] // Вопросы

технического прогресса в электродной промышленности : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1971. – Вып. 3. – С. 193–204.

24. Знамеровский В.Ю. Исследование характеристик процесса графитации в опытно-промышленной установке прямого нагрева / В.Ю. Знамеровский, В.А. Коцюр, Ю.Г. Юргенс [и др.] // Технологические процессы и оборудование электродного производства : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, ГосНИИЭП, 1989. – С. 58–64.
25. Чалых Е.Ф. Технология углеграфитовых материалов / Е.Ф. Чалых. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 304 с.
26. Доржиев М.Н. Научные основы применения постоянного тока для процесса графитации / М.Н. Доржиев, Е.И. Евсеев, Л.Е. Серебренникова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. – Вып. 5. – С. 121–128.
27. Доржиев М.Н. Определение электрических потерь в короткой сети печи графитации на постоянном токе / М.Н. Доржиев, В.Г. Матвеев, Е.Л. Петров // Вопросы графитации углеродистых материалов : Сб. научн. тр. – М. : Цветметинформация, 1968. – Ч. 2. – С. 24–27.
28. Доржиев М.Н. Опыт графитирования электродной продукции на ДЭЗе постоянным током силой 50 кА / М.Н. Доржиев, Л.Е. Серебренникова, В.А. Лыков // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. – Вып. 5. – С. 105–114.
29. Доржиев М.Н. Электрический баланс большегрузных графитируемых печей ЧЭЗа / М.Н. Доржиев, Н.И. Чичулин, В.Н. Яхонтов [и др.] // Вопросы графитации углеродистых материалов : Сб. научн. тр. – М. : Цветметинформация, 1968. – Ч. 2. – С. 28–37.
30. Доржиев М.Н. Некоторые закономерности процесса графитации электродных заготовок в электрических печах сопротивления / М.Н. Доржиев // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1974. – Вып. 6. – С. 40–45.

31. Мохова Н.Н. Выбор характеристик грансостава шихты кокса-наполнителя ниппельного графита / Н.Н. Мохова, С.Д. Федосеев // Производство углеродных материалов : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, 1981. – С. 59–64.
32. Чичулин Н.И. Снижение электрического сопротивления электродных заготовок крупных диаметров / Н.И. Чичулин, М.Ф. Огнева, Б.И. Давыдович // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1976. – Вып. 8. – С. 69–73.
33. Знамеровский В.Ю. Влияние удельного электросопротивления пересыпки на температурный режим печи графитации / В.Ю. Знамеровский, В.В. Яшкина // Цветные металлы. – 1985. – № 2. – С. 39–41.
34. Чичулин Н.И. Применение беспесочной теплоизоляционной шихты в печах графитации / Н.И. Чичулин, О.В. Мокрушина, О.М. Схнов // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1976. – Вып. 8. – С. 73–77.
35. Знамеровский В.Ю. Методика исследования промышленных печей графитации / В.Ю. Знамеровский, Д.М. Кузнецов, В.А. Коцюр [и др.] // Промышленная энергетика. – 1988. – № 9. – С. 32–34.
36. Пат. 15247 Україна, МПК⁷ B29C 47/58, B29C 47/38. Короб для просушення сипких матеріалів / Є.М.Панов, І.Л.Шилович, М.В.Коржик, С.В.Лелека ; заявл. 29.12.2005 ; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.
37. Соседов В.П. Экспериментальное определение температурных полей зерна печи графитации углеродных материалов / В.П. Соседов, Г.Н. Матющенко, М.А. Авдеенко // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1975. – Вып. 10. – С. 42–47.
38. Кузнецов Д.М., Фокин В.П. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования / Д.М. Кузнецов, В.П. Фокин. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2001. – 132 с.
39. Пат. 2781 Україна, МПК⁷ G01K 11/12. Візирна труба для пірометрії / Є.М.Панов, М.В.Коржик, І.Л.Шилович, С.В.Лелека ; заявл. 11.11.2003 ; опубл. 16.08.2004, Бюл. № 8.

40. Гордов А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М. : Металлургия, 1971. – 448 с.
41. Геращенко О.А. Температурные измерения : Справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, В.И. Лах [и др.] – К. : Наукова думка, 1984. – 496 с.
42. Данишевский С.К. Высокотемпературные термодары / С.К. Данишевский, Н.И. Сведе-Швец. – М. : Металлургия, 1977. – 232 с.
43. Первезенцев В.П. Совершенствование существующих и разработка новых технологий графитации углеродных материалов : автореф. дис. на соискание науч. степ. докт. техн. наук : спец. 05.17.11 / В.П. Первезенцев. – М., 1999. – 75 с.
44. Пат. 25052 Україна, МПК⁷ G01K 3/00, C01B 31/04. Спосіб визначення температури заготовок у високотемпературних печах / Є.М.Панов, С.В.Кутузов, В.В.Деркач [та інш.] ; заявл. 12.03.2007 ; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.
45. Пат. 67404 Україна, МПК⁷ G05D 23/275, G08B 1/00. Пристрій для сигналізації рівня температури в печах графітації / Є.М.Панов, М.В.Коржик, І.Л.Шилович [та інш.] ; заявл. 15.09.2003 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 9.
46. Пат. 23422 Україна, МПК⁷ C01B 31/04, G01K 3/00. Спосіб визначення середньої температури заготовок в печі графітації / Є.М.Панов, С.В.Кутузов, О.Ю.Уразлина [та інш.] ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 25.05.2007, Бюл. № 7.
47. Розенберг В.Л. Метод расчета индуктивностей токопроводящей системы «кern графитировочной печи – боковые шинопакеты» / В.Л. Розенберг, В.А. Сычев, Я.В. Метелица // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1985. – С. 15–18.
48. Сычев В.А. Расчет индуктивностей некоторых конструкций токопроводящей системы боковые шинопакеты – графитовочная печь / В.А. Сычев // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск : ЧПИ, 1986. – С. 23–25.
49. Панов А.К. Растекание тока в углеродистых образцах / А.К. Панов, А.А. Попова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной

- продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. – Вып. 5. – С. 101–105.
50. Огнева М.Ф. Механизм нагревания цилиндрической электродной заготовки в графитировочной печи / М.Ф. Огнева, В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых, Н.И. Чичулин // Цветные металлы. – 1974. – № 10. – С. 42–45.
51. Чичулин Н.И. К вопросу графитации крупногабаритных электродов / Н.И. Чичулин, Е.И. Евсеев // Вопросы технического прогресса в электродной промышленности : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1971. – Вып. 3. – С. 162–169.
52. Ахметшин Н.Ф. Электрический и температурный режим графитации электродных заготовок / Н.Ф. Ахметшин, Е.Ф. Чалых, Е.Н. Шабуров [и др.] // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1975. – Вып. 7. – С. 44–51.
53. Фридман А.М. Методика моделирования тепловых полей печей графитации / А.М. Фридман, М.Г. Аветьян, Н.А. Михайлова [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1978. – Вып. 13. – С. 6–11.
54. Огнева М.Ф. Степень влияния градиента температур в заготовка на оптимизацию режимов графитации / М.Ф. Огнева, А.Д. Кокурин, В.Ю. Смирнова [и др.] // Производство углеродных материалов : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, 1981. – С. 75–82.
55. Короленко Ю.П. К вопросу об электро моделировании нестационарных температурных полей / Ю.П. Короленко, П.П. Плотников // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск : ЧПИ, 1966. – С. 161–165.
56. Знамеровский В.Ю. Математическое моделирование процессов теплообмена в электрических печах сопротивления при производстве электродного графита / В.Ю. Знамеровский, В.В. Яшкина // Промышленная энергетика. – 1984. – № 2. – С. 31–33.

57. Знамеровский В.Ю. Особенности решения задач теплопроводности с внутренним источником теплоты / В.Ю. Знамеровский // Промышленная энергетика. – 1986. – № 3. – С. 24–26.
58. Горбенко В.И. О выборе интервала времени при численном методе расчета температурных полей / В.И. Горбенко // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск : ЧПИ, 1973. – С. 113–116.
59. Горбенко В.И. Некоторые методы численного решения уравнения теплопроводности при переменных коэффициентах / В.И. Горбенко // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск : ЧПИ, 1975. – С. 172–177.
60. Черненко И.И. Расчет термических напряжений в цилиндре из анизотропного углеграфитового материала / И.И. Черненко, В.А. Кравцов, Г.В. Розанова // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. 4. – С. 124–128.
61. Николаев Н.Н. Термическое напряжение в цилиндрических заготовках при графитации / Н.Н. Николаев, А.Г. Ганзен, В.А. Китова [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1975. – Вып. 10. – С. 48–58.
62. Горбенко В.И. О генерации сеток при решении задач теплопроводности по методу балансов энергии / В.И. Горбенко // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск : ЧПИ, 1986. – С. 75–78.
63. Короленко Ю.А. К определению интервала времени при расчете сопряженных задач теплопроводности по неявной схеме / Ю.А. Короленко // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : Сб. научн. тр. – Челябинск : ЧПИ, 1989. – С. 15–18.
64. Доржиев М.Н. Влияние параметров процесса графитации на качество графитированных электродов / М.Н. Доржиев, Е.И. Евсеев, Е.Г. Шляпин [и др.]

- // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1975. – Вып. 7. – С. 13–23.
65. Кузин Б.М. Совершенствование технологии производства электродов диаметром 555 мм / Б.М. Кузин, Е.Н. Шабуров, А.А. Алексеев [и др.] // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1975. – Вып. 7. – С. 23–28.
66. Павловский А.М. Интенсификация процесса графитации электродов на Челябинском электродном заводе / А.М. Павловский, З.В. Столярова, Н.П. Подольская [и др.] // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1976. – Вып. 8. – С. 48–53.
67. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – М. : Мир, 1968. – 460 с.
68. Чичулин Н.И. Зависимость электропроводности углеродистых материалов от температуры при графитации / Н.И. Чичулин, Е.Л. Петров // Вопросы технического прогресса в электродной промышленности : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1971. – Вып. 3. – С. 107–112.
69. Ахметшин Н.Ф. Влияние свойств междуэлектродной пересыпки на электрические, тепловые показатели и качество электродов / Н.Ф. Ахметшин, М.Н. Доржиев, Е.Н. Шабуров [и др.] // Вопросы технического прогресса в электродной промышленности : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1971. – Вып. 3. – С. 205–213.
70. Чарыкова Л.Н. Зависимость теплопроводности сыпучих углеродистых материалов различного грансостава от температуры и давления / Л.Н. Чарыкова, Н.И. Чичулин, Е.И. Евсеев // Техника и технология графитированных электродов : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1972. – Вып. 4. – С. 47–53.
71. Горпиненко М.С. Современное состояние и научно обоснованные требования к нефтяному коксу – сырью для производства графитированных электродов / М.С. Горпиненко, В.В. Зеленина, И.Ф. Сухоруков [и др.] // Совершенствование

технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1975. – Вып. 7. – С. 102–112.

72. Лутков А.И. Исследование теплофизических свойств углеграфитового материала в зависимости от температуры и времени термической обработки / А.И. Лутков, С.Е. Вяткин, Б.К. Дымов [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgiya, 1966. – Вып. 2. – С. 88–98.
73. Аверина М.В. Зависимость свойств коксов от их структуры / М.В. Аверина, А.И. Николаев, Л.З. Синельников // Цветные металлы. – 1975. – № 5. – С. 43–47.
74. Гуревич Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : Справочное издание в 4-х т. / Л.В. Гуревич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.] – Т. 2 ; Кн. 1. – М. : Наука, 1979. – 440 с.
75. Лутков А.И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А.И. Лутков. – М. : Metallurgiya, 1990. – 196 с.
76. Лутков А.И. Тепло- и электропроводность конструкционного графита в интервале 80–2500°K / А.И. Лутков, Б.К. Дымов, В.И. Волга // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgiya, 1969. – Вып. 4. – С. 59–66.
77. Виноградова К.П. Исследование свойств графита на основе крекингowego кокса / К.П. Виноградова, Н.О. Гусман, В.А. Черных [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgiya, 1981. – Вып. 16. – С. 67–71.
78. Чичулин Н.И. Теплоизолирующие материалы графитировочных печей / Н.И. Чичулин, М.Ф. Огнева, О.В. Мокрушина [и др.] // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1975. – Вып. 7. – С. 176–182.
79. Лутков А.И. Тепло- и электропроводность пересыпки при графитации / А.И. Лутков, В.Н. Михайлов, Б.К. Дымов // Цветные металлы. – 1975. – № 5. – С. 41–43.
80. Разработка математической модели промышленного процесса графитации с целью его оптимизации и усовершенствования : Отчет о НИР ГосНИИЭП, Инв.

№ 02850062203 / [руководитель В.Ю. Знамеровский] ; опубл в сб. реф. НИР и ОКР, ВНТИЦентр. – Серия 17. – 1986. – № 15. – Реф. 61.15.86.165.

81. Самохин И.Н. Опыт эксплуатации печей с принудительным охлаждением стен и подины при повышенной плотности тока в керне для производства конструкционного графита / И.Н. Самохин, И.М. Розенман, В.Б. Сасс-Тисовский // Вопросы графитации углеродистых материалов : Сб. научн. тр. – Ч. 1. – М. : Цветметинформация, 1968. – С. 70–78.
82. Соседов В.П. Особенности электрического и теплового режимов печи графитации / В.П. Соседов // Конструкционные углеграфитовые материалы : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1964. – Вып. 1. – С. 99–159.
83. Знамеровский В.Ю. Разработка математической модели печи графитации на стадии охлаждения / В.Ю. Знамеровский, А.Н. Бусов, М.В. Полухина [и др.] // Совершенствование технологии электродного производства : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, ГосНИИЭП, 1988. – С. 71–77.
84. Соседов В.П. О рациональном графике подъема мощности и температуры а процессе графитации / В.П. Соседов, Сасс- В.Б. Тисовский, А.С. Карманов // Цветные металлы. – 1967. – № 2. – С. 62–63.
85. Чичулин Н.И. Исследование режимов нагревания электродных заготовок при графитации / Н.И. Чичулин, В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых, Б.И. Давыдович // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1974. – Вып. 6. – С. 128–134.
86. Знамеровский В.Ю. Исследование режимов ввода энергии в печи графитации / В.Ю. Знамеровский, В.В. Яшкина // Промышленная энергетика. – 1985. – № 11. – С. 40–42.
87. А. с. 1089048 СССР, МКИ³ C01B 31/04, G05D 27/00. Способ контроля теплового режима процесса графитации / И.Н.Глушко. – № 3433981/23–26 ; заявл. 01.03.1982 ; опубл. 30.04.1984, Бюл. № 16.
88. Негуторов Н.В. Влияние температуры коксования связующего на скорость нагрева углеродных заготовок при графитации / Н.В. Негуторов, Д.М. Кузнецов // Кокс и химия. – 1990. – № 10. – С. 19–21.

89. Пат. 2028977 Россия, МКИ⁶ C01B 31/04. Способ контроля процесса графитации углеродного материала / Д.М. Кузнецов, Н.В. Негуторов, Е.П. Шадрина [и др.] ; заявл. 04.12.1989 ; опубл. 20.02.1995, Бюл. № 11.
90. А. с. 929552 СССР, МКИ³ C01B 31/04, G05D 27/00. Способ управления процессом графитации в печи / Ю.М. Поповкин, Н.И. Рогалева. – № 2996659/23–26 ; заявл. 24.10.1980 ; опубл. 23.05.1982, Бюл. № 19.
91. А. с. 1312074 СССР, МКИ⁴ C01B 31/04, F27D 19/00. Способ управления процессом графитации / Ю.М. Поповкин, В.И. Кваша. – № 3829027/22–02 ; заявл. 18.12.1985 ; опубл. 23.05.1987, Бюл. № 19.
92. А. с. 634078 СССР, МКИ² F27D 19/00, G06 B 11/01. Устройство для управления процессом графитации / Ю.М. Поповкин, В.П. Кузнецов. – № 2380339/22–24 ; заявл. 01.07.1976 ; опубл. 25.11.1978, Бюл. № 43.
93. А. с. 653214 СССР, МКИ² C01B 31/02, G05D 27/00. Способ регулирования процесса термообработки обожженных углеродистых заготовок / Г.А. Лушников, М.Т. Соболевский, Г.Н. Матющенко. – № 2529969/23–26 ; заявл. 03.10.1977 ; опубл. 25.03.1979, Бюл. № 11.
94. Знамеровский В.Ю. Математическая модель автоматического управления мощностью электрической печи сопротивления при графитации углеродных изделий / В.Ю. Знамеровский, В.В. Яшкина // Промышленная энергетика. – 1987. – № 8. – С. 42–43.
95. Панов Е.Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов / Е.Н. Панов, С.В. Лелека, М.В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – №2. – С. 28–30.
96. Самсонов Г.В. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В. Самсонов, А.И. Киц, О.А. Кюздени [и др.] – К. : Наукова думка, 1972. – 224 с.
97. Сухарев А.Г. Курс методов оптимизации / А.Г. Сухарев, А.В. Тимохов, В.В. Федоров. – М. : Физматлит, 2005. – 368 с.
98. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы / П.В. Куропаткин. – М. : Высш. Школа, 1980. – 287 с.

99. Дымов Б.К. Теплопроводность, удельное электросопротивление и тепловое расширение конструкционных материалов на основе графита в интервале температур 100–3000°K / Б.К. Дымов, А.И. Лутков, В.И. Волга [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1971. – Вып. 6. – С. 45–58.
100. Шулепов С.В. Определение и расчет термодинамических функций, характеризующих состояние графитируемых тел / С.В. Шулепов, Н.М. Ярмочкина // Вопросы графитации углеродистых материалов: Сб. научн. тр. – Ч. 1. – М. : Цветметинформация, 1968. – С. 17–24.
101. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / [под ред. Н.Д.Егупова] // Методы классической и современной теории автоматического управления. – Т.2. – М. : МГТУ им. Баумана, 2000. – 736 с.
102. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М. : Наука, 1975. – 568 с.
103. Борзенко И.М. Адаптация, прогнозирование и выбор решений в алгоритмах управления технологическими объектами / И.М. Борзенко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
104. Александровский Н.М. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Н.М. Александровский, С.В. Егоров, Р.Е. Кузин. – М. : Энергия, 1973. – 272 с.
105. Кулаков Г.Т. Инженерные экспрес-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. – Мн. : Выш. шк., 1984. – 192 с.
106. Бессонов Л.А. Электромагнитное поле : 10-е изд. / Л.А. Бессонов. – М. : Гордарики, 2003. – 317 с.
107. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М. : Мир, 1981. – 304 с.
108. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М. : Мир, 1977. – 352 с.
109. Лыков А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.

110. Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам / В.Р. Кулинченко. – К. : Техніка, 1990. – 165 с.
111. Баскаков А.П. Теплотехника / А.П. Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт [и др.] – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
112. Физические свойства углеродных материалов / Сб. ст. под ред. С.В.Шулепова – Челябинск : ЧГПИ, 1983. – 95 с.
113. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов : Справочник / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
114. Осипищева Н.В. Изучение объемных изменений нефтяных коксов при термообработке / Н.В. Осипищева, Н.Н. Шипков, В.В. Зеленина [и др.] // Производство углеродных материалов : Сб. научн. тр.. – М. : НИИГрафит, 1981. – С. 13–19.
115. Молоткова Т.Л. Исследование влияния температуры первого обжига на качество ниппельного графита / Т.Л. Молоткова, Т.Н. Соборницкая, Н.А. Тупикина [и др.] // Производство углеродных материалов : Сб. научн. тр. – М. : НИИГрафит, 1981. – С. 68–75.
116. Зеленина В.В. Подготовка сырья и качество графитированных материалов / В.В. Зеленина, М.Н. Доржиев, Н.С. Мельникова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1976. – Вып. 8. – С. 91–95.
117. Морозов М.Г. Теплоемкость графита при низких температурах / М.Г. Морозов, Л.А. Пекельн // Конструкционные углеграфитовые материалы : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1964. – Вып. 1. – С. 196–223.
118. Волга В.И. Удельная теплоемкость и энтальпия конструкционного графита / В.И. Волга, Б.К. Дымов, В.В. Лагутенко [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1967. – Вып. 3. – С. 136–144.
119. Волга В.И. Теплопроводность графита при низких температурах / В.И. Волга, Б.К. Дымов, В.К. Усов [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1970. – Вып. 5. – С. 84–89.

120. Виргильев Ю.С. Соотношение между электросопротивлением и теплопроводностью углеродных материалов / Ю.С. Виргильев, А.Н. Деев, Н.И. Козлов [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1970. – Вып. 5. – С. 94–98.
121. Черных В.А. Вычисление плотности упаковки многокомпонентных смесей дисперсных материалов по их гранулометрическому составу / В.А. Черных // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1972. – Вып. 7. – С. 9–20.
122. Полисар Э.Л. Зависимость плотности графитированных материалов от их плотности после обжига / Э.Л. Полисар, Б.В. Абросимов // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1979. – Вып. 14. – С. 19–22.
123. Лутков А.И. Зависимость удельного электросопротивления искусственного графита в интервале 400–3000°K от температуры термообработки / А.И. Лутков // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1969. – Вып. 4. – С. 67–73.
124. Дымов Б.К. Исследование теплофизических свойств материалов на основе углерода в процессе термической обработки / Б.К. Дымов, А.И. Лутков, Э.Ю. Лукина [и др.] // Конструкционные материалы на основе графита : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgy, 1973. – Вып. 8. – С. 90–95.
125. Гуревич Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : Справочное издание в 4-х т. / Л.В. Гуревич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.] – Т. 2 ; Кн. 2. – М. : Наука, 1979. – 344 с.
126. Карвацький А.Я. Застосування методу граничних елементів для розв'язання тривимірних задач теплопровідності / А.Я. Карвацький, П.Й. Дудніков, С.В. Лелека, А.І. Жученко // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2005. – № 5. – С. 5–13.
127. Дешко В.І. Моделювання складного теплообміну під час росту оксидних кристалів методами спрямованої вертикальної кристалізації / В.І. Дешко, А.Я. Карвацький, О.В. Ленькін // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2003. – № 3. – С. 20–28.

128. Bykova S.V. Numerical and Experimental Investigation of Crystal Growth Rate Dependence on Facet Undercooling for Dielectric Crystal Growth from the Melt / S.V. Bykova, V.D. Golyshev, M.A.Gonik [and other] // Heat Transfer Engineering. – Vol. 27. – Number 2/March, 2006, – P. 43–57.
129. Цирлин А.М. Оптимальное управление технологическими процессами / А.М. Цирлин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
130. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.
131. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1979. – 560 с.
132. Карвацький А.Я. Застосування методу граничних елементів для розв’язання задач теорії статичної термопружності / А.Я. Карвацький, І.Л. Шилович, С.В. Лелека // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2001. – № 3. – С. 64–71.
133. Кузнецов Д.М. Усадочные явления при графитации заготовок в печах Костнера / Д.М. Кузнецов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 8. – С. 46–48.
134. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейз. – М. : Мир, 1974. – 320 с.
135. Трохименко Я.К. Инженерные расчеты / Я.К. Трохименко, Ф.Д. Любич. – К. : Техніка, 1985. – 326 с.
136. Дьяконов В. Анализ, идентификация и моделирование систем. / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2002. – 448 с.
137. Коржик М.В. Метод оцінювання ступеня графітації / М.В. Коржик, А.І. Жученко // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 1. – С. 52–54.
138. Коржик М.В. Вдосконалення регламенту графітації електродних виробів / М.В. Коржик, І.Л. Шилович, А.І. Жученко, О.Ю. Уразліна // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2004. – № 2. – С. 107–109.
139. Коржик М.В. Исследование электрического поля печи графитации / М.В. Коржик, А.Я. Карвацкий, И.Л. Шилович, О.Ю. Уразлина // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 2. – С. 25–31.

140. Коржик М.В. Структура системи керування піччю графітації / М.В. Коржик, А.І. Жученко // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2005. – № 6. – С. 19–24.
141. Коржик М.В. Керування стадією розігріву печі графітації / М.В. Коржик // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – № 2. – С. 69–78.
142. Коржик М.В. Модель температурного поля печі графітації / М.В. Коржик, С.В. Кутузов // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2007. – № 1. – С. 17–23.
143. Пат. 66270 Україна, МПК⁷ C01B 31/04, H05B 3/60. Спосіб графітації / М.В. Коржик, І.Л. Шилович, А.І. Жученко [та інш.] ; заявл. 15.09.2003 ; опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
144. Пат. 26858 Україна, МПК⁷ C01B 31/04, H05B 3/60. Спосіб графітації / М.В. Коржик, А.Я. Карвацький, А.І. Жученко [та інш.] ; заявл. 22.05.2007 ; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.
145. Пат. 86020 Україна, МПК⁷ C01B 31/04, H05B 3/60. Спосіб графітації електродних заготовок / Є.М. Панов, О.Ю. Уразлін, М.В. Коржик [та інш.] ; заявл. 21.11.2005 ; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.
146. Пат. 69350 Україна, МПК⁷ F27B 5/00, C01B 31/00. Спосіб випалювання вуглецевих виробів в багатокамерній кільцевій печі / Є.М. Панов, І.В. Пулінець, М.В. Коржик [та інш.] ; заявл. 19.10.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
147. Пат. 69351 Україна, МПК⁷ H01M 4/133. Спосіб формування керна печі графітації / М.В. Коржик, А.І. Гурчик ; заявл. 19.10.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
148. Панов Е.Н. Интенсификация процесса графитации электродных изделий в печах Ачесона постоянного тока / Е.Н. Панов, М.В. Коржик, А.Я. Карвацкий // Аллюминий Сибири – 2007 : XIII междун. конф., 11–13 сент. 2007. : доклады – Красноярск : Версо, 2007 г. – С. 331–337.
149. Коржик М.В. Алгоритм керування процесом графітації в печах постійного струму / М.В. Коржик, А.І. Жученко // Автоматика – 2008 : 15 міжн. конф. з авт. управління, 23–26 вер. 2008 р. : доповіді – Одеса : ОНМА, 2008. – С. 817–820.

150. Коржик М.В. Розробка системи керування процесом графітації в печах Ачесона / М.В. Коржик, А.І. Гурчик // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2010. – № 1. – С. 98–103.
151. Панов Є.М. Применение модели Дракера-Прагера для исследования состояний печи графитации / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, М.В. Коржик [та інш.] // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 1д. – С. 37–44.
152. Коржик М.В. Алгоритм прогнозирования степени графитации электродных заготовок / М.В. Коржик // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 1д. – С. 44–48.
153. Коржик М.В. Система керування процесом охолодження печі графітації / М.В. Коржик, А.І. Гурчик // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 2. – С. 123–127.
154. Коржик М.В. Алгоритм керування піччю графітації в нештатному режимі / М.В. Коржик // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2012. – № 1. – С. 101–106.
155. Коржик М.В. Дослідження бічного шунта печі графітації / М.В. Коржик, А.І. Гурчик // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 3/5. – С. 39–43.
156. Панов Є.М. Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів : моногр. / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, І.Л. Шилович [та інш.]. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 103 с.
157. Карвацький А.Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів : моногр. / А.Я. Карвацький, Є.М. Панов, С.В. Кутузов [та інш.]. – К.: НТУУ „КПІ”, 2012. – 352 с.

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	10
1.1. Теоретичні основи синтезу штучного графіту	10
1.2. Показники якості графітованих електродів	13
1.3. Технологічні особливості виробництва графітованих електродів	15
1.4. Характеристика печі графітації як об'єкта керування	19
1.5. Аналіз інформаційного забезпечення процесу графітації в печах Ачесона	27
1.6. Аналіз існуючих моделей процесу графітації	32
1.7. Аналіз способів керування процесом графітації в печах Ачесона	37
1.7.1. Керування за електротехнічними параметрами	37
1.7.2. Керування за температурою футеровки	38
1.7.3. Керування за досягнутою температурою керна	39
1.7.4. Керування за градієнтом температур	39
1.7.5. Керування за омичним опором	41
1.7.6. Керування за сигналами акустичної емісії	41
1.8. Аналіз систем керування печами графітації	42
1.9. Постановка завдання досліджень	46
1.10. Висновки до розділу 1	47
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ В ПЕЧІ АЧЕСОНА	49
2.1. Задачі та загальна характеристика експериментальних робіт	49
2.2. Методика експериментальних досліджень	51
2.2.1. Визначення електротехнічних параметрів	51
2.2.2. Визначення температури термопарним способом	51

2.2.3.	Визначення температури пірометричним способом	53
2.2.4.	Визначення температури непрямим методом	54
2.3.	Ординарний регламент	55
2.4.	Форсований регламент	62
2.5.	Порівняльний аналіз експериментальних даних	65
2.6.	Висновки до розділу 2	70
3.	РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТАЦІЇ	72
3.1.	Вибір критерію керування та вимоги до математичного опису процесу графітації	72
3.2.	Декомпозиція задачі керування	77
3.3.	Стратегія керування	79
3.4.	Структура системи керування	81
3.5.	Висновки до розділу 3	83
4.	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНІВ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ В ПЕЧІ АЧЕСОНА	85
4.1.	Математична модель електричного поля печі графітації	85
4.1.1.	Модель електричного поля ядра печі графітації	85
4.1.2.	Числове моделювання електричного поля ядра	89
4.1.3.	Спрощена модель електричного поля печі графітації	93
4.2.	Математична модель температурного поля печі графітації	97
4.2.1.	Загальна форма моделі температурного поля	97
4.2.2.	Оцінювання умов теплообміну на зовнішніх границях	100
4.2.3.	Числове моделювання температурного поля ядра	103
4.2.4.	Ентальпійна форма моделі температурного поля	107
4.2.5.	Адаптивна модель температурного поля	109
4.2.6.	Оцінювання зовнішніх збурень печі графітації	116
4.3.	Математична модель поля термічних напружень	118
4.3.1.	Оцінювання умов виникнення термічних напружень	118
4.3.2.	Модель термопружного стану електродних заготовок	122

4.3.3.	Оцінювання температурного розширення виробів	124
4.3.4.	Числове моделювання поля термічних напружень	126
4.4.	Оцінювання ступеня графітації виробів	127
4.4.1.	Кінетична модель ізотермічної графітації	128
4.4.2.	Визначення достатнього ступеня графітації	129
4.4.3.	Спрощена форма моделі	131
4.5.	Висновки до розділу 4	135
5.	РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТАЦІЇ В ПЕЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	137
5.1.	Керування стадією розігріву	137
5.1.1	Критерій керування стадією розігріву	137
5.1.2.	Алгоритм керування стадією розігріву	138
5.1.3.	Алгоритм адаптивної процедури	141
5.1.4.	Алгоритм визначення субоптимального керування	143
5.2.	Керування стадією графітації	145
5.2.1.	Алгоритм керування стадією графітації	146
5.2.2.	Алгоритм прогнозування ступеня графітації	148
5.3.	Керування процесом графітації в нештатному режимі	150
5.4.	Дослідження системи керування процесом графітації	153
5.5.	Висновки до розділу 6	160
	ВИСНОВКИ	162
Додаток А.	Експериментальне дослідження ординарної кампанії графітації	164
Додаток Б.	Експериментальне дослідження кампанії графітації з форсованим регламентом	174
Додаток В.	Електро- та теплофізичні властивості пічних матеріалів	181
Додаток Д.	Моделювання температурного поля при ординарному регламенті	186
Додаток Е.	Моделювання температурного поля при оптимальному керуванні	193
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	201

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

Наукове видання
Жученко Анатолій Іванович, д.т.н.,
Коржик Михайло Володимирович, к.т.н.,
Кутузов Сергій Володимирович, к.т.н.

**КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТАЦІЇ
ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРОДНОЇ ПРОДУКЦІЇ**

Монографія

Формат 60×90¹/₁₆.

Ум. друк. арк. 14,0. Обл.-вид. арк. 13,02.

Наклад 300 прим. Зам. № 13-25.

ТОВ «Видавничий дім «Києво-Могилянська академія»».
Свідоцтво про реєстрацію № 1801 від 24.05.2004 р.

Адреса видавництва:

04070, м. Київ, Конtrakтова пл., 4

Тел./факс: (044) 425-60-92

E-mail: phouse@ukma.kiev.ua

www.publish-ukma.kiev.ua

Жученко А. І.

Ж94 Жученко А. І., Коржик М. В., Кутузов С. В. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції [Текст] : монографія. – К.: НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2013. – 224 с.: іл. – Бібліогр.: 201–217. – 300 прим.

ISBN 978-966-518-634-2

У монографії розглянуто питанням автоматизованого керування процесом графітації в печах Ачесона постійного струму.

Проведено аналіз експериментальних досліджень кампаній графітації, виявлено особливості протікання основних процесів у печі Ачесона. Здійснено декомпозицію задачі керування процесом. Сформульовано критерії оптимізації для частинних задач керування. Розроблено адаптивну модель температурного поля печі графітації та модель термопружного стану виробів під час кампанії графітації. Розроблено ефективний метод оцінювання ступеня графітації виробів під час кампанії графітації. Створено алгоритми керування стадіями процесу графітації. Запропоновано дворівневу систему керування процесом графітації в печах Ачесона постійного струму, яка на базі розроблених алгоритмів забезпечує істотну економію електроенергії на кожну кампанію графітації та зменшує їх тривалість.

Для фахівців з автоматизації електродного виробництва, електрометалургії, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.