

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ

На правах рукопису

ТИЩЕНКО ВІКТОРІЯ МАРКІВНА

ИДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ  
ЗА ДОПОМОГОЮ АДАПТИВНОГО ФІЛЬТРА СТОСОВНО ДО  
ВИРОБНИЦТВА КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І НАПІВПРОВІД -  
НИКОВИХ СТРУКТУР

05.14.05 - теоретичні основи теплотехніки

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 1992

Лб 26.59

Робота виконана у відділі моделювання теплових і механічних процесів Інституту проблем машинобудування АН України

Науковий керівник: член-кореспондент АН України,  
доктор технічних наук  
Мацевитий Ю.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Симбірський Д.Ф.

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
Елькін Б.С.

Провідна установа: Український науково-дослідний  
інститут металів

Захист відбудеться "04" 02. 1993 р. о 14.00 годині  
в ауд. № III2 на засіданні спеціалізованої вченої ради  
Д.016.22.01 при Інституті проблем машинобудування АН України  
310046, м.Харків, вул.Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий "30" 12. 1993 р.

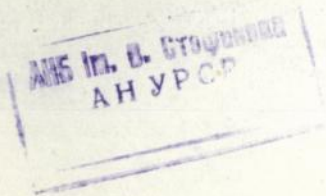
Вчений секретар  
спеціалізованої  
вченої ради  
доктор технічних наук,  
професор

В. А. Малаєренко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816973 (У)



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується впровадженням складних теплотехнологічних процесів великої потужності, наявністю рідких вимог щодо підвищення якості продукції, що випускається та максимальній швидкодії технологічних систем. При цьому зростає роль математичного моделювання теплових процесів як ефективного методу дослідження, а у ряді випадків і як єдиної можливості здійснювати оптимізацію технологічних процесів. Для побудови математичної моделі досліджуваного теплофізичного об'єкта необхідна наявність умов однозначності. В той же час складність конструкцій, висока вартість і трудомісткість теплофізичних експериментів зумовлює на практиці явну недостачу достовірних вихідних даних. У зв'язку з цим все більша увага приділяється оберненим задачам теплопровідності (ОЗТ), в яких за наявними обмеженими відомостями про температурне поле об'єкта можна визначити умови однозначності, яких не вистачає, а також уточнити саму математичну модель системи. Серед методів, що використовуються для розв'язання ОЗТ, значне місце займають імовірні методи, що враховують стохастичність характеристик теплового процесу та процесу спостережень. Одним з найбільш поширених імовірних методів є метод оптимальної динамічної фільтрації, що успішно застосовується для розв'язання задач ідентифікації теплових систем. Дуже важливим є поширення розроблених підходів на задачі оптимального управління теплотехнологічними процесами з використанням одержаних оцінок параметрів в режимі реального часу. В цих умовах розробка більш ефективних в обчислювальній точці зору алгоритмів оцінювання та використання їх для розв'язання конкретних задач є дуже актуальною.

Дисертаційна робота виконувалась у 1989 - 1992 рр. у відповідності до таких планів науково-дослідних робіт ІПМаш АН України: д/б темою "Розробка методів і засобів ідентифікації та діагностики технічних характеристик теплотехнічних установок та об'єктів" (№ Д.р. 01880019600), затвердженої Постановою Президії АН України від 24.12.87р. і д/б темою "Теплообмін в енергетичних установках, технологічних процесах та об'єктах радіоелектроніки", виконуваної за рішенням ВРНП АН України від 03.12.90 р. № 8 §54; г/д в Норильському гірничо-металургійному комбінаті (ГМК) "Дослідження впливу змін теплових умов роботи печі плавки в рідкій ван-

ні Норильського ГМК на розподіл температур в тілі кесонів і розробка методики виявлення та прогнозування місць можливого утворення тріщин" (№ Д.р. 01880049867).

Мета роботи. Розробка і практичне застосування єдиного методу розв'язання задач ідентифікації й оптимізації теплових процесів для удосконалення технологій виробництва кольорових металів і напівпровідникових структур.

Наукова новизна. У дисертації вперше одержано такі основні результати, що виносяться на захист:

- Адаптивний фільтр як єдина методика розв'язання задач ідентифікації й оптимізації теплових процесів.
- Економічний алгоритм адаптивного фільтра з умовою зупинки ітераційного процесу, яка регуляризує, дозволяючи на кожному часовому крокові одержувати оцінки теплотехнологічних параметрів і використовувати їх для побудови оптимальної стратегії управління, яка переводить систему до необхідного стану.
- Спосіб побудови нестационарної матриці вимірів, за допомогою якої в адаптивному фільтрі здійснюється облік взаємного впливу поля температур і шуканих параметрів.
- Коефіцієнти тепловіддачі та щільності теплових потоків на внутрішній робочій поверхні охолоджуваних елементів печей Ванюкова (ПВ).
- Методика діагностики руйнування відгороджених елементів печей кольорової металургії.
- Математична модель процесів тепло-масопереносу при активаційному відпалі арсенід-галієвих напівпровідникових пластин з діелектричним покриттям.
- Оптимальна стратегія управління режимом активаційного відпалу напівпровідникових пластин з урахуванням обмежень на максимальний градієнт і перепад температур по товщині пластини.

Практичне цінність і використання результатів роботи.

Адаптивний фільтр реалізовано у вигляді пакета програм для розв'язання задач ідентифікації та оптимізації параметрів теплотехнологічних процесів у кольоровій металургії і при формуванні областей  $N$ -типу провідності на напівізолюючому арсеніді галію.

Розроблену в роботі методику виявлення та прогнозування місць можливого руйнування кесонів впроваджено в Державному інституті кольорових металів у 1989 р.

Застосування методики дозволяє виявляти та прогнозувати тріщини-

ноутворення кесонів, збільшувати міжремонтний цикл роботи печі і провадити заміну окремих кесонів без переривання технологічного процесу.

Достовірність отримуваних результатів підтверджується розв'язанням методичних задач, а також порівнянням розрахункових та експериментальних даних.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались на міжгалузевій науково-технічній конференції по проблемам функціональної діагностики газотурбінних двигунів і їх елементів (Москва-Харків-Гибаче, 1990 р.) ; на IV Всесоюзній школі-семінарі молодих вчених і спеціалістів " Актуальні питання теплофізики і фізичної гідрогазодинаміки " (Алушта, 1991 р.) , на міжнародній конференції "Тепломасообмін в технологічних процесах" (Дрмала, 1991р.) , на II Мінському міжнародному форумі з тепло-та масообміну (Мінськ, 1992) і на XVP науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів ІПМаш АН України (Харків, 1990) .

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано II друкованих робіт.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновку містить 28 рисунків, 3 таблиці, додаток на I сторінці та список використаної літератури із 105 найменувань, усього 164 стор.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі приведено різні типи моделей теплових систем, розглянуто питання класифікації ОЗТ та методи їх розв'язання на основі робіт О.М.Аліфанова, Дж.Бека, Л.А.Коздоби, Ю.М.Мазецитого, О.В.Мултановського, Д.Ф.Симбірського, А.М.Тихонова та ін. Особливе місце приділено імовірному підходу до розв'язання ОЗТ, зокрема методу оптимальної динамічної фільтрації та його модифікаціям. Досліджено постановку та спільність стохастичних задач ідентифікації й оптимального управління теплотехнологічними процесами.

Огляд літератури дозволив сформулювати мету та задачі дисертаційної роботи, а також визначити, що пошук керуючої дії у рамках імовірного підходу може провадитись шляхом розв'язання задачі ідентифікації.

Другий розділ присвячено розробці адаптивного фільтра для розв'язання задач ідентифікації й оптимізації теплових процесів, дослідженню обчислювальних властивостей фільтра та розробці

прийомів поліпшення його якісних характеристик. Фільтр, що пропонується, названо адаптивним, оскільки істотною особливістю його є здатність адаптуватися до досліджуваних процесів, параметрів, що ідентифікуються, класу задач ідентифікації та управління і до процесу спостереження (матриця вимірів видозмінюється з надходженням нових експериментальних даних). Як вихідна модель в адаптивному фільтрі, що пропонується, є рівняння вимірів вигляду:

$$\tilde{Y}_k = \tilde{h}(\tilde{z}_k, \kappa) + \tilde{V}_k, \quad (1)$$

де  $\tilde{Y}_k$  - випадковий вектор спостережень;  $\tilde{z}_k$  - шуканий вектор параметрів управління;  $\tilde{V}_k$  - векторний білий гаусовський шум.

Для побудови єдиної методики ідентифікації параметрів та пошуку керуючої послідовності задача оптимального стохастичного управління ставиться таким чином, щоб усі обмеження  $\tilde{B}_k$  на фазові координати та їх похідні ввійшли до вектора спостережень

$\tilde{Y}_k$ . У теплових системах як фактори, що спостерігаються та обмежуються, можуть виступати температура  $T(\tau)$  в будь-яких точках об'єкта, а також градієнти температури за часом і простором

Функціонал якості, що враховує як адекватність моделі, так і поведінку вектора управління записується у вигляді:

$$I_k[\tilde{z}_k, \tilde{Y}_k, j] = M \left\{ \sum_{i=1}^k \left[ \|\tilde{h}(\tilde{z}_{i/j}^0) - \tilde{Y}_i\|_{R_i}^2 + \frac{1}{j(i)} \|\tilde{z}_i - \tilde{z}_{i/j}^0\|_{[R_{i-1}, I_i]}^2 \right] \right\} \quad (2)$$

Мінімізація функціонала проводиться за усіма параметрами (управліннями)  $\tilde{z}_i$ , обмеженими областю  $\beta$  ( $|\tilde{z}_i| \leq \beta_i$ ). Шукана оптимальна послідовність визначається із умови

$$\{\tilde{z}_k\} = \arg \{ I_{k \min}[\tilde{z}_i, \tilde{Y}_i], 0 \leq i \leq k \}, \quad (3)$$

де  $I_{\min}$  може бути записаний у вигляді рекурентного співвідношення, оскільки кожна із складових в (1) залежить від свого  $i$ -го управління. Таким чином, на кожному  $k$ -му часовому крокові ідентифікується оцінка шуканого параметра  $\tilde{z}_{k/k}$ , сукупність яких  $\{\tilde{z}_{k/k}\}$  складає керуючу послідовність, що переводить систему до необхідного стану.

Оцінки параметрів (управлінь)  $\tilde{z}_k$ , що мінімізують функціонал (1) знаходяться за допомогою алгоритму адаптивного ітераційного фільтра, який записується так:

$$\tilde{z}_{k/k}^{(j)} = \tilde{z}_{k/k}^{(j-1)} + K_k^{(j)} \left\{ \tilde{Y}_k - \tilde{h}[\tilde{z}_{k/k}^{(j-1)}] \right\}; \quad (4)$$

$$K_{\kappa}^{(j)} = P_{\kappa-1/\kappa-1} [\hat{H}_{\kappa}^{(j)}]^T \{ \hat{H}_{\kappa}^{(j)} P_{\kappa-1/\kappa-1} [\hat{H}_{\kappa}^{(j)}]^T + R_{\kappa} \}^{-1} \quad (5)$$

$$P_{\kappa-1/\kappa-1} = [I - K_{\kappa-1}^{(i)} \hat{H}_{\kappa-1}^{(i)}] P_{\kappa-2/\kappa-2} [I - K_{\kappa-1}^{(i)} \hat{H}_{\kappa-1}^{(i)}]^T + K_{\kappa-1}^{(i)} R_{\kappa-1} [K_{\kappa-1}^{(i)}]^T \quad (6)$$

де  $j$  - чергова ітерація на  $\kappa$ -му кроці;  $i$  - остання ітерація на  $(\kappa-1)$ -му кроці;  $R_{\kappa}$  - коваріаційна матриця похибок вимірів;  $P_{\kappa-1/\kappa-1}$  коваріаційна матриця помилки оцінки;  $K_{\kappa}$  - вагова матриця фільтра.

Матриця вимірів  $\hat{H}_{\kappa}^{(j)}$  визначається як векторна частинна похідна

$$\hat{H}_{\kappa}^{(j)} = \left\{ \frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} \right\}_{\kappa}^{(j)} = \left\{ \frac{\partial \vec{h}[\vec{x}_{\kappa}^{(j)}, \kappa]}{\partial \vec{x}} \right\}_{\kappa}^{(j)} \quad (7)$$

Оскільки для обчислювання цієї матриці потрібне визначення вектора стану (поля температур) чи його оцінок, то необхідним є розв'язання прямої задачі теплопровідності, яка у загальному випадкові може бути записана у вигляді нелінійного стохастичного рівняння:

$$\vec{X}_{\kappa} = \vec{f}(\vec{X}_{\kappa-1}, \kappa) + \Psi(\vec{X}_{\kappa-1}, \kappa) \vec{U}_{\kappa} + \Psi(\vec{X}_{\kappa-1}, \kappa) \vec{W}_{\kappa}, \quad (8)$$

де у правій частині замість невідомих компонент вектора управління  $\vec{U}_{\kappa}$  подставляються оцінки  $\hat{x}_{\kappa/\kappa}^{(j-1)}$ ;  $\vec{W}_{\kappa}$  - некорельована перешкода (шум)-біла гаусовська послідовність. Результат розв'язання рівняння (8) являє собою оцінку вектора стану, що обчислюється послідовно, починаючи з  $\vec{X}_0$ .

Для розв'язання задачі управління з використанням одержаних оцінок параметрів в режимі реального часу алгоритм фільтрації повинен бути особливо ефективним в обчислювальній точці зору. Економічність алгоритму, що пропонується, досягається тим, що замість розширеного вектора стану визначаються лише оцінки шуканого стохастичного вектора параметрів. Це дає можливість обійтись без побудови перехідних матриць, які прив'язані до конкретного процесу та до конкретних параметрів. Якщо звичайно при переході від однієї задачі, що розв'язується (пошук  $\alpha, \varphi, \lambda, C_v$  та ін.) до другої потрібне попереднє перетворення скінченно-різницевої математичної моделі, а значить, і зміна перехідних матриць, то в адаптивному фільтрі, що пропонується, ніяких апріорних перебудов стандартного запису рівнянь теплопровідності та граничних умов

не потрібно. Побудову ж нестационарної матриці вимірювань можна проводити, виходячи з будь-якої у тому числі нелінійної вихідної моделі досліджуваного процесу. Щодо стосується вектора вимірювань, то до нього при використанні адаптивного фільтра, крім безпосередніх вимірювань, можна включати будь-яку відому інформацію про процес, у тому числі будь-які обмеження на градієнти температури за часом і простором, значення температури в будь-яких точках об'єкта, перепади температур і т.д., лише була б можливість розрахунку частинних похідних  $\left\{ \frac{\partial \hat{Y}}{\partial \hat{X}} \right\}_k^{(j)}$ . Таким чином, шляхом трансформації вектора вимірювань алгоритм адаптивного фільтра перетворюється в процедуру ідентифікації або управління.

Оскільки обернені задачі у своїй вихідній постановці є некоректними, необхідно проводити регуляризацію одержуваних рішень.

Як фактор, що регуляризується в алгоритмі адаптивного фільтра, пропонується використовувати число проведених ітерацій на кожному часовому крокові. Умова, що враховує як стійкість обчислювального процесу, так и його збіжність, можна записати таким чином:

$$\| \vec{h} [\hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j)}] - \tilde{Y}_k \| + \| \hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j)} - \hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j-1)} \| \leq \varepsilon (\sigma), \quad (9)$$

де  $\tilde{Y}_k = \{ \tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_k \}$ ,  $\hat{Y}_k = \vec{h} [\hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j)}] = \{ h[x_{1/k}^{(j)}], \dots, h[x_{k/k}^{(j)}] \}^T$ . Вираз (9) носить де що умовний характер. На практиці зупинник ітераційного процесу здійснюється по першому виконанню однієї з умов

$$\| \hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j)} - \hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j-1)} \| \leq \varepsilon \quad (10)$$

$$\| \vec{h} [\hat{\vec{x}}_{k/k}^{(j)}] - \tilde{Y}_k \| \leq \gamma \sum_{i=1}^k \sigma_i \quad (11)$$

де в умові "злипання" (10) параметр  $\varepsilon$  вибирається в залежності від необхідної точності ідентифікації шуканого параметра  $\vec{x}$ . Вираз (11) являє собою умову погодження середньоквадратичної похибки від вимірювань з величиною сумарної за  $k$  моментів часу нев'язки.

Збіжність фільтра визначається величиною елементів коваріаційної матриці помилок оцінок  $P_{k/k}$ , що убувають за часом.

Як критерій збіжності фільтра можна використати умову

$$[\hat{\vec{y}}_k^{(j)}]^T \hat{\vec{v}}_k^{(j)} \leq \gamma, T_2 \{ \hat{H}_k^{(j)} P_{k-1/k-1} [\hat{H}_k^{(j)}]^T + R_k \} \quad (12)$$

Невиконання цієї керівності означає, що дійсна помилка оцінки (ліва частина  $(I_k)$ ) перевищує завбачену теоретично (права частина  $(I_2)$ ) більше ніж в  $\gamma$  раз, тобто фільтр розходиться. Для приведення до відповідності реальної помилки оцінювання та теоретичної пропонується впливати на елементи матриці  $P_{k/k}$ , деяким скалярним коефіцієнтом,  $S_k$ , який може змінювати своє значення до тих пір, поки умова (9) не виконається.

Для реалізації алгоритму адаптивного ітераційного фільтра необхідна побудова нестационарної матриці вимірювань  $H_k'$ . Розрахунок елементів цієї матриці, що являють собою векторні частинні похідні (7), провадиться шляхом числового диференціювання. Процес побудови  $H_k'$  розбивається на 2 етапи. Перший включає до себе розв'язок прямої задачі теплопровідності (8) для визначення поля температур і формування вектора опорних значень. На другому етапі провадиться операція числового диференціювання розрахованого вектора спостережень за параметрами.

Дослідження регулярності розробленого алгоритму провадилась на прикладі розв'язання задачі ідентифікації локальних параметрів теплообміну. При переході від однієї або двох локальних величин до більшого їх числа істотно ускладнюється реалізація умов зупинки ітераційного процесу на кожному крокові рекурентного алгоритму та збільшується некоректність оберненої задачі теплопровідності, що вирішується. Тому у випадку, що розглядається, (шість змінних за часом локальних коефіцієнтів теплообміну, нелінійна постановка задачі), використано такі прийоми поліпшення якості алгоритму як ітераційна та крокова регуляризація. Особливу увагу приділено питанням впливу величини похибки вимірювань на стійкість і збіжність процесу ідентифікації.

Можливості адаптивного фільтра в оптимізації теплотехнологічних параметрів досліджено на прикладі процесу відпалу напівпровідникових пластин. Як параметр, що ідентифікується, розглядалась щільність теплового потоку  $q$ , яка регламентує режим активційного відпалу. Процес формування оптимальної стратегії управління здійснювався таким чином, що на кожному часовому крокові "k" з урахуванням оцінки  $f_{kk}$ , що знов ідентифікується, розраховувалось поле температур в пластині і провадилась порівняння сдержаних значень температури поверхні, максимального градієнта температури та перепаду температур по товщині пластини із заданими

обмеженнями на ці величини.

У III розділі мова йде про застосування алгоритму адаптивного фільтра для розв'язання задач ідентифікації та діагностики теплових процесів в енерготехнологічних агрегатах металургійного виробництва. Металургійні агрегати, як правило, працюють у складних термічних умовах. Зокрема, умови роботи печей, що застосовуються у кольоровій металургії, характеризуються істотними стрибками теплового навантаження з боку вогневої зони (пуск та зупинка печі), відсутність футеровки, сколювання або пошкодження гарнісажу. Проектування та розрахунок надійних конструкцій, здатних витримувати тимчасові локальні пікові теплові навантаження, потребують достовірних даних про всі можливі умови теплообміну стінових елементів, що огорожуються, з зоною розплаву. Визначення цих умов є можливим розв'язанням відповідних зовнішніх ОЗТ на основі розробленої методики ідентифікації теплових параметрів.

Як опорні значення, по яких ідентифікуються теплові потоки  $q$  на вогневій поверхні елементів, що огорожуються, використовувались результати термометрування, одержані за допомогою термопар, що зачепані на зовнішній поверхні кесонів (дані НГМК). Для перевірки адекватності математичної моделі процесу і границі регулярності запропонованого алгоритму були розв'язані методичні задачі по визначенню параметрів теплообміну на робочій поверхні рядових і фурмених кесонів і по оцінюванню впливу температури холодоагента на умови теплообміну та температурне поле кесона.

Задовільна збіжність температурних полів, одержаних за умовами теплообміну, що ідентифікуються та заданими підтвердила достовірність результатів ідентифікації, що дозволило перейти до визначення коефіцієнтів тепловіддачі та щільностей теплових потоків на внутрішній робочій поверхні рядових і фурмених кесонів печей Ванюкова (ПВ) у процесі робочої кампанії печі з урахуванням реальної погрішності вимірювань.

Достовірність одержаних умов теплообміну перевірена порівнянням температур, розрахованих за знайденими умовами теплообміну з експериментальними температурами в тих же точках.

Для дослідження теплового стану кесонів при наявності технологічного браку в каналах и при різному стані гарнісажу були побудовані температурні поля кесонів, що знаходяться на початку процесу руйнування на робочій поверхні. Терморуйнування кесонів в

достатньо агресивному середовищі ПВ відповідає критичній для міді температурі  $400^{\circ}\text{C}$ . Розв'язання ряду обернених задач в ідентифікації щільностей теплових потоків і відновленню температурного поля по відомій критичній температурі  $400^{\circ}\text{C}$  на вогневій поверхні дозволило одержати граничні порогові значення температур на зовнішній поверхні кесонів, що свідчать про початок руйнування вогневої поверхні. Описаний підхід в сполученні з результатами проведених досліджень дозволяють виявляти аномалії, що відносяться як до всієї вогневої поверхні кесона, так і до конкретного місця окремого стінного елемента, і в результаті - прогнозувати можливе руйнування кесона. На основі розробленої методики ідентифікації параметрів теплообміну розв'язана - задача діагностики стану подини печі завислої плавки (ПЗП). Подина ПЗП являє собою багатшарову конструкцію, що складається з внутрішніх і теплоізолювальних матеріалів. За результатами термометрування (дані НГМА) ідентифіковані приведені коефіцієнти теплообміну на поверхні заглиблення термопар, за допомогою яких можна визначити товщину незруйнованого шару, а значить, знайти величину руйнування в цій точці подини. Проведені дослідження показали, що за допомогою запропонованої методики є можливим спільне розв'язання зовнішніх і геометричних обернених задач теплопровідності.

IV розділ присвячено дослідженню процесів тепломасопереносу при активаційному відпалі напівпровідникових пластин. Розроблена методика дає можливість сформулювати оптимальну стратегію управління режимом активаційного відпалу. Режим відпалу вважається оптимальним, якщо температура поверхні досягає певної величини ( $T_n$ ), результуючий кінцевий профіль концентрації імплантованої домішки стає близьким до заданого, загальний час технологічного процесу є мінімальним, і виконуються обмеження, накладені на температурні градієнти та перепади температур по товщині пластини. Цю задачу можна віднести до класу задач управління з максимальною швидкістю.

Розглядався процес активаційного відпалу напівпровідникової арсенідгалієвої пластини з діелектричним покриттям із  $\text{SiO}_2$ . На підставі конценції досередженої ємності, запропонованої Д.М.Мацевитим і В.П.Шерішевим, розроблено математичну модель процесів тепломасопереносу при активаційному відпалі в системі "пластина-покриття". Досліджено динаміку полів температури та концентрації

імплантованої домішки в процесі активаційного відпалу при рухові пластин з постійною швидкістю відносно джерела випромінювання та у випадку її фіксованого положення. Аналіз результатів числового експерименту показав, що використання в моделі зосередженої ємності дає можливість істотно скоротити об'єм обчислень, при цьому похибка розрахунку полів температур не перевищує 10 %, що не істотно позначається на точності розрахунку полів концентрації. Це дозволяє використовувати запропоновану модель при управлінні процесом активаційного відпалу напівпровідникових пластин. Формування оптимальної стратегії управління здійснювалось так, що якщо будь-яка із розрахованих компонент вектора вимірювань

$$\hat{Y}_k = ([\hat{T}_n]_k, [\frac{\partial \hat{T}}{\partial x}]_k, [\Delta \hat{T}]_k) \quad \text{досягає заданої}$$

граничної величини з урахуванням допустимого інтервалу відхилень, то оцінка щільності теплового потоку на наступному крокові

$(\hat{q}_{k+1/k+1})$  штучно встановлюється рівною нулю і залишається такою на всі наступні моменти часу, доки відзначена компонента не ввійде в норму. Таким чином, стратегія управління відпалом включає два етапи: нагрівання поверхні до максимально можливої температури під дією потоку  $\hat{q}_{k/k}$  та видержка ( $\hat{q}_{k/k} = 0$ ), необхідна для прогрівання активованого шару. Як умови, що визначають найкраще наближення результуючого профілю концентрації домішки, одержаної в процесі відпалу, використовувались 2 критерії: перший критерій припускає, що масовіст домішки за межами активованого шару повинен бути мінімальним. Другий визначає рівномірність розподілу домішки по активованому шару.

За допомогою побудованої оптимальної стратегії управління режимом активаційного відпалу вдалось одержати необхідний розподіл домішки за мінімально можливий час з дотриманням обмежень на градієнти та перепади температур, що виникають у пластині під час відпалу.

#### Основні результати роботи.

Основним підсумком цієї роботи є розробка єдиного підходу до розв'язання задач ідентифікації та оптимізації теплових процесів на базі оптимальної динамічної фільтрації та побудова економічного алгоритму, пристосованого для числової реалізації задач ідентифікації, діагностики та оптимізації теплових процесів.

Розроблена методика застосована для розв'язання практичних задач (металургія та напівпровідникова техніка).

Основні висновки :

1. Запропоновано адаптивний ітераційний фільтр як єдину методику розв'язання задач ідентифікації та оптимізації теплових процесів.
2. На базі запропонованого методу розроблено економічний алгоритм, що дозволяє на кожному часовому крокові одержувати оцінки теплотехнологічних параметрів і використовувати їх для побудови оптимальної стратегії управління, що переводить систему до потрібного стану.
3. Визначено регуляризуючу умову зупинки ітераційного процесу в фільтрі. Введено критерій збіжності фільтра, що використовується для коректування коваріаційної матриці помилок оцінок шляхом дії на елементи матриці деякого скалярного коефіцієнта при порушенні умов збіжності.
4. Запропоновано спосіб визначення нестационарної матриці вимірювань, за допомогою якої в алгоритмі адаптивного фільтра здійснюється облік взаємного впливу поля температур і шуканих параметрів.
5. Проведено дослідження регулярності розробленого алгоритму на прикладі розв'язання нелінійної задачі ідентифікації локальних параметрів теплообміну.
6. Для випадку ідентифікації змінних за часом локальних коефіцієнтів теплообміну розроблено прийоми поліпшення якості запропонованого алгоритму з використанням процедур ітераційної та крокової регуляризації. Показано, що точність оцінок, що отримуються, у цьому випадку, залежить від величини похибки вимірювань та від числа параметрів, що ідентифікуються.
7. Показано, що адаптивність запропонованого алгоритму, зв'язана з відсутністю необхідності побудови перехідних матриць; причому не потрібно ніяких апріорних перетворень математичної моделі поза залежність від розв'язуваної задачі ідентифікації чи управління.
8. Економічність розробленого алгоритму з точки зору необхідного обсягу пам'яті ЕОМ, невисока розмірність фільтра та практична відсутність помилок округлення дозволяють застосовувати для розв'язання задач ідентифікації та тепловими процесами малорозрядні ЕОМ.

9. Розроблену методику ідентифікації теплотехнологічних параметрів застосовано для визначення коефіцієнтів тепловіддачі та щільностей теплових потоків на робочій поверхні охолоджуваних кесонованих елементів печей Ванюкова.
10. Запропоновано методику діагностики руйнування стінових елементів і подини печей кольорової металургії на основі ідентифікації граничних умов теплообміну. Результати проведених досліджень використані на Норильському гірничо-металургійному комбінаті для виявлення та прогнозування місць можливого тріщинотворення кесонів.
11. З використанням концепції зосередженої ємкості розроблено математичну модель процесів тепломасопереносу при активаційному відпалі напівпровідникових пластин з діелектричним покриттям.
12. Побудовано оптимальну стратегію управління режимом активаційного відпалу напівпровідникових пластин, що дозволяє одержати необхідний розподіл концентрації введеної домішки в активованому шарі пластини з урахуванням обмежень на максимальний градієнт і перепад температур по товщині пластини.

Основний зміст дисертації опубліковано у таких роботах:

1. Мацевитий Д.М., Дултановський О.А., Тимченко В.М., Шерішев В.П. Оптимізація теплотехнологічних параметрів активаційного відпалу напівпровідникових пластин // Математичне моделювання процесів і апаратів: Тез. доп. наук.-техн. сем., Іваново, 1990. - С. 3-4.
2. Бутенко О.В., Балашова Н.А., Панасенко П.В. та ін. Моделювання активаційного відпалу напівпровідникових пластин // Там же. - С. 5-6.
3. Тимченко В.М. Моделювання та ідентифікація теплообміну в охолоджуваних конструкціях металургійних агрегатів // Там же. - 7 с.
4. Мацевитий Д.М., Дултановський О.В., Тимченко В.М., Шерішев В.П. Моделювання з використанням адаптивного фільтра процесу термоаміщення поверхонь конструктивних елементів // Проблеми функціональної діагностики газотурбінних двигунів та їх елементів: Тез. доп. міжгалузєвої науково-технічної конф., М.-Харків -Рибаче, 1990. - С.20-21.

5. Мацевитий Ю.М., Мултановський О.В., Тимченко В.М., Сльчище - ва І.В. Діагностика руйнування охолоджуваних кесонованих стінових елементів на основі ідентифікації умов теплообміну // Пром.теплотехніка. - 1991. - 13, № 3. - С.3-12.
6. Тимченко В.М. Моделювання процесів теплопереносу при активаційному відпалі напівпровідникових пластин // Актуальні питання теплофізики та фізичної гідрогазодинаміки: Тез. доп. ІУ Всесоюз. школи-сем. молодих вчених і фахівців, Алушта, 1991. - С.100-101.
7. Мацевитий Ю.М., Мултановський О.В., Тимченко В.М. Моделювання теплових процесів та ідентифікація локальних параметрів теплообміну за допомогою адаптивного ітераційного фільтра // Теплофізика високих температур. - 1992. - 30, № 1. - С.82-91.
8. Мацевитий Ю.М., Балашова Н.А., Мултановський О.В. та ін. Моделювання тепломасопереносу при активаційному відпалі арсенідгалієвих напівпровідникових пластин // Теплофізика високих температур. - 1992. - 30, 13. - С.601-610.
9. Мацевитий Ю.М., Єржанов Р.Ж., Тимченко В.М., Шершєв В.П. Оптимізація параметрів активаційного відпалу напівпровідникових пластин // Теплофізика високих температур. - 1992. - 30, № 6. - С.11-17.
10. Мацевитий Ю.М., Мултановський О.В., Тимченко В.М., Сльчищева І.В. Обчислювальний експеримент з ідентифікації теплових навантажень на елементи металургійного обладнання // Тепломасообмін: Тез. доп. Міжнар. форуму з тепло-та масообміну., Мінськ, 1992. - т. 9, ч. II. - [с.119-122]
11. *Matsevity Yu.M., Moultanovskiy A.V., Timchenko V.M., Shezysher V.P. Thermal processes at activated annealing of semiconductor materials // Heat and Mass Transfer in Technological Processes: Abstr. of Reports of Int. Conference, Turmala, 1991. - p. 141-142.*

Ав 26.594

Відповідальний за випуск  
д.т.н., чл.-кор.АН України Божко О.Е.

Підп.до друку 25.12.92. Формат 60 x 84 1/16. Папір  
тип. № 1. Умов.друкарк.1.0.Обл.вид.арк.0.96. Тираж 100 прим.  
Замовл. 2727 . Безплатно.

---

Виготовлено на ротаринті ІПМаш АН України  
310046, Харків - 46, вул.Дм.Повжарського, 2/10