

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Д. О. Ковалюк, С. М. Москвіна

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ
ОБ'ЄКТІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ
ПАРАМЕТРАМИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 681.5:519.876.2
ББК 31.391
К 64

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 27.03.2008 р.)

Рецензенти:

А. І. Жученко, *доктор технічних наук, професор*,
Р. Н. Кветний, *доктор технічних наук, професор*

Ковалюк, Д. О.

К 64 Моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами : монографія / Д. О. Ковалюк, С. М. Москвіна. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 182 с.

ISBN 978-966-641-337-9

В монографії розглядається сучасні методи моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами та можливі шляхи підвищення їх ефективності за рахунок спільного використання чисельних методів та інтелектуальних технологій. Запропоновано комбіновані моделі управління такими об'єктами та метод визначення оптимальних параметрів їх функціонування. Наведені приклади практичного використання таких моделей та методів.

Робота розрахована на науковців, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів, які займаються розробкою систем підтримки прийняття рішень для управління складними теплотехнологічними об'єктами.

УДК 681.5:519.876.2
ББК 31.391

ISBN 978-966-641-337-9

© Д. Ковалюк, С. Москвіна, 2010

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень та позначень.....	6
Вступ.....	8
1. Аналіз сучасних методів моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	11
1.1. Класифікація теплових об'єктів та приклади теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	11
1.2. Задачі моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	17
1.3. Моделі теплотехнологічних об'єктів.....	21
1.4. Аналіз методів моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	29
1.4.1. Аналітичні методи.....	29
1.4.2. Чисельні методи.....	35
1.4.3. Інтелектуальні методи.....	38
1.5. Проблеми моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	41
2. Підходи до підвищення ефективності методів моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	43
2.1. Вдосконалення моделей теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами	43
2.1.1. Дослідження обмежень застосування чисельних методів.....	43
2.1.2. Підвищення швидкодії існуючих моделей.....	51
2.2. Оптимізація параметрів моделей теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	52
2.2.1. Врахування функціонування теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами в рамках технологічного процесу.....	53
2.2.2. Визначення оптимальних параметрів моделей теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами для управління якістю продукції на прикладі процесу випалювання.....	55

2.2.2.1. Опис технологічного процесу виготовлення будівельної кераміки.....	55
2.2.2.2. Опис тунельної печі випалювання.....	58
2.2.2.3. Визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного об'єкта з розподіленими параметрами для управління якістю продукції.....	62
2.3. Врахування ризику прийняття рішень при управлінні теплотехнологічними об'єктами з розподіленими параметрами....	65
3. Метод моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	67
3.1. Загальна схема методу моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами.....	67
3.2. Нечітка складова моделі теплотехнологічного об'єкта з розподіленими параметрами.....	70
3.2.1. Вибір способу застосування нечіткого контролера для управління теплотехнологічним об'єктом з розподіленими параметрами	70
3.2.2. Структура нечіткої моделі теплотехнологічного об'єкта з розподіленими параметрами.....	77
3.2.3. Застосування нечіткої моделі теплотехнологічного об'єкта з розподіленими параметрами для моделювання тунельних печей випалювання.....	84
3.3. Дослідження адекватності нечіткої моделі	91
4. Метод визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного об'єкта з розподіленими параметрами.....	96
4.1. Загальна схема методу визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного об'єкта з розподіленими параметрами на прикладі процесу випалювання.....	96
4.1.1. Логіко-імовірнісна модель класифікації марки виробів.....	99
4.1.2. Модель коригування температурного поля.....	109
4.1.3. Модель прогнозування якості продукції.....	116
4.2. Аналіз задачі оптимізації та вибір методу її розв'язання....	125
4.3. Розв'язання задачі оптимізації параметрів моделі.....	135

5. Приклади практичної реалізації запропонованих підходів в системах управління технологічними процесами.....	140
5.1. Структура сучасних систем управління технологічними процесами.....	140
5.2. Застосування інтелектуальних технологій в підсистемі управління тунельною піччю випалювання.....	143
5.3. Алгоритм визначення оптимальних параметрів моделі випалювання	147
5.4. Опис програмного забезпечення для моделювання системи оптимального управління процесом випалювання.....	150
5.5. Оцінка ефективності методу та обчислювальної складності алгоритмів.....	159
Висновки.....	161
Література	163
Додаток А. База правил нечіткої моделі ТОРП.....	179
Додаток Б. Процедура оптимізації параметрів функцій належності нечіткої моделі	180
Додаток В. Коефіцієнти кореляції факторів моделі ТП.....	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ОРП	–	об'єкт з розподіленими параметрами;
ОЗП	–	об'єкт з зосередженими параметрами;
ТОРП	–	теплотехнологічний об'єкт з розподіленими параметрами;
ТП	–	технологічний процес;
АСУТП	–	автоматизована система управління технологічним процесом;
НМ	–	нейронна мережа;
ЛІ	–	логіко-імовірнісний;
$Q(x, t)$	–	функція стану ТОРП;
$N[Q(x, t)]$	–	лінійний оператор, що описує початкові умови для функції стану $Q(x, t)$ ТОРП;
$\Gamma[Q(x, t)]$	–	лінійний оператор, що описує граничні умови для функції стану $Q(x, t)$ ТОРП;
θ	–	безрозмірна температура;
Bi	–	критерій Біо;
$t = t(x, y, z, \tau)$	–	температурне поле зразка;
t_f	–	температура газового потоку;
N	–	нормаль до поверхні зразка;
G	–	область виробів;
S	–	адіабатна межа області;
Ω	–	теплосприймальна межа області;
M	–	міцність виробів ТП виготовлення будівельної кераміки;
$\mathbf{Y} = (y_1, \dots, y_n)$	–	вектор характеристик якості виробів;
$\mathbf{S} = (s_1, \dots, s_m)$	–	вектор параметрів сировини;
$\mathbf{D} = (d_1, \dots, d_k)$	–	вектор параметрів процесу сушіння;
$\mathbf{Z} = (z_1, \dots, z_l)$	–	вектор збурень ОРП;
$\mathbf{T} = (T_1, \dots, T_m)$	–	вектор температурного поля ОРП;
$\mathbf{E} = (e_1, \dots, e_n)$	–	вектор похибок вимірювання та моделювання ОРП;
W_z	–	швидкість руху вагонеток з виробами;
H_z	–	розрахункова висота керамічної стінки;
$E(T)$	–	ентальпія при температурі T ;
L_{Ib}	–	коефіцієнт витрати повітря, що поступає на горіння;
$T_z(x_2, x_3, t)$	–	температура керамічної стінки;

$T_m(x_1, t)$	– температура захисної стінки;
Q_n^p	– найнижча теплотворна здатність палива;
P_{jr}^v	– ймовірність r -ї ознаки j -го фактора на v -му кроці оптимізації;
$dP1_{jr}$	– приріст ймовірностей градацій на v -му кроці оптимізації;
$\mu^t(x)$	– функція належності фактора x нечіткому числу t ;
$O_A(f(n))$	– часова складність, виражена числом арифметичних операцій;
MSE	– середня квадратична помилка;
J	– функціонал помилки навчання нейронної мережі;
KN_{\max}	– максимальна кількість нейронів мережі;
$Z = Z(X)$	– q -вимірний вектор-функція вихідних змінних;
$I_q(Z(X))$	– функціонал скорочення розмірності;
SQP	– метод послідовного квадратичного програмування;

ВСТУП

Процеси теплової обробки є важливою складовою багатьох промислових виробництв в енергетиці, металургії, хімічній та будівельній промисловості. Для функціонування таких процесів використовуються різноманітні теплові установки та агрегати, окремим класом яких є теплотехнологічні об'єкти з розподіленими параметрами (ТОРП), що характеризуються такими властивостями: неперервністю теплового процесу, розподілом температурного поля по довжині ОРП, розбиттям ТОРП на зони з можливістю окремого управління температурою на кожній з них, повздовжнім переміщенням оброблюваного матеріалу, сталим часом його перебування на конкретній позиції ТОРП та значним впливом етапу термічної обробки на його характеристики.

Управління такими об'єктами є достатньо складною задачею, тому що потребує досягнення не тільки балансу температури (яка може досягати 1500 °С–2000 °С) та тиску газу для забезпечення заданого температурного поля вздовж ТОРП, але і заданої якості вихідної продукції. І хоча в сучасній вітчизняній промисловості використовується велика кількість різноманітних АСУТП вітчизняного та іноземного виробництва, однак досі виникає необхідність розв'язання задач оптимального управління такими об'єктами з метою як зменшення енергозатрат, так і підвищення якості вихідної продукції.

На наш погляд вирішення цих задач потребує нового підходу як до методів моделювання, так і до методів управління ТОРП, з використанням сучасних інтелектуальних технологій.

Аналіз математичних моделей та методів моделювання ТОРП засвідчив, що для них характерні певні недоліки, які значно обмежують їх ефективність. По-перше, застосування найбільш поширених чисельних кінцево-різницевого методів, які забезпечують високу точність розв'язання, вимагає великих витрат машинних ресурсів при реалізації на ЕОМ. Це суттєво ускладнює використання кінцево-різницевого методу в існуючих системах управління, що працюють в реальному масштабі часу. По-друге, незважаючи на складність та аварійність об'єкта дослідження, при моделюванні ТОРП зазвичай не враховується ризик прийнятого для управління рішення, що, як відо-

мо, може призвести або до великих матеріальних та енергетичних втрат або до зниження якості продукції. І третім аспектом, є розробка математичних моделей таких об'єктів без врахування зовнішніх впливів, призначених лише для підтримання заданого еталонного температурного режиму. Разом з тим, врахування факторів всього технологічного процесу, частинною якого виступає ТОРП, починаючи від початкового етапу формування сировини і закінчуючи показниками якості кінцевої продукції, дозволяє розв'язувати задачу пошуку оптимальної температурної кривої відповідно до зміни температури і вологості повітря, властивостей сировини, відхилень в підготовці виробів та досягати значного енергозбереження.

Аналізуючи описані вище проблеми, сучасний стан та тенденції розвитку засобів моделювання, зрозуміло, що використання традиційного математичного апарату, ґрунтованого на кінцево-різницевих перетвореннях моделі динаміки таких об'єктів, навіть при ряді спрощень та припущень дозволяє розв'язувати лише окремі задачі моделювання температурних полів. В зв'язку зі складністю обчислень такі моделі, незважаючи на використання паралельних обчислень, не дозволяють оперативно реагувати на відхилення температурних режимів та визначати параметри управління для їх стабілізації. Крім того, зазначені класичні методи можуть бути застосовані лише для формалізованих задач з відомими параметрами процесу. Проте в ряді випадків побудувати математичну модель традиційними засобами досить складно, що пов'язано з особливостями цього процесу або неможливістю вимірювання його параметрів.

Сказане вище вимагає перегляду методології моделювання ТОРП. На нашу думку, сьогодні виходом із такої ситуації є поєднання високоточних класичних методів та швидких і зрозумілих математичних моделей, ґрунтованих на використанні інтелектуальних технологій, бурхливий розвиток яких привів до появи нового класу систем управління – інтелектуальних систем. Перевірені часом математичні моделі та засоби моделювання на базі інтелектуальних технологій використовуються для задач прогнозування, діагностики, управління складними об'єктами. Їх застосування для моделювання ТОРП дозволить ефективно керувати режимами складних ТП, здійснювати формаліза-

цію людського досвіду при розв'язанні складних проблем ідентифікації стану об'єкта та прийняття рішень.

Таким чином, підвищення ефективності методів моделювання ТОРП може бути здійснене за рахунок поєднання класичних та інтелектуальних технологій, направлених на створення швидких моделей для мінімізації відхилення температурного поля, що дозволить враховувати показники ризику при управлінні тепловими об'єктами, зменшити енергетичні витрати та забезпечити задану якість вихідної продукції.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В сучасних умовах побудова, дослідження і використання математичних моделей теплових об'єктів є запорукою їх успішного та оптимального функціонування. В більшості випадків стан таких об'єктів залежить як від часової, так і просторової координати, тому розглянемо особливості методів моделювання об'єктів з розподіленими параметрами та особливості їх застосування для теплотехнологічних об'єктів.

1.1. Класифікація теплових об'єктів та приклади теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами

Теплові об'єкти на сьогодні є важливою складовою багатьох виробничих процесів у різних галузях промисловості. Класифікація таких об'єктів, виявлення конструктивних і функціональних особливостей є першочерговою задачею для їх математичного опису та подальшого використання отриманих моделей в системах автоматичного управління.

В наш час розроблено різні класифікації теплових об'єктів [5–7], однією з яких є класифікація за видом теплових процесів, що визначаються такими факторами:

- 1) інтенсивністю підведення теплоти на поверхню матеріалів, що обробляються;
- 2) інтенсивністю перенесення теплоти всередині матеріалу, що обробляється;
- 3) інтенсивністю підведення маси матеріалів, що обробляються, до поверхні їх реакції (деякі окисні та відновні процеси, випалювання або плавлення);
- 4) інтенсивністю молекулярного перенесення маси всередині матеріалу, що обробляється (обробка багатокomпонентних початкових матеріалів, наприклад, варіння скла, сталі тощо);
- 5) інтенсивністю перемішування фаз (твердих, рідких) у зоні їх термічної обробки.

З поміж існуючих класифікацій слід виокремити також класифікацію теплових об'єктів, показану на рис. 1.1, яка, як зазначено в [8, 9], найбільш повно відображає види теплових об'єктів з точки зору їх конструктивних особливостей.



Рис. 1.1. Класифікація теплових об'єктів

Ця класифікація оснований за такими ознаками:

1. За технологічним призначенням:
 - а) плавильні печі, призначені для плавлення матеріалів (металів, мінералів, скла тощо). До них належать доменні та мартенівські печі, вагранки, печі для плавлення кольорових металів, склоплавильні та інші печі;
 - б) нагрівальні печі, які використовуються для нагрівання металу перед обробкою тиском, прокаткою, куванням, штамповкою;

- в) термічні печі для нагрівання матеріалів з метою їх термічної обробки – загартування, відпалювання, нормалізації;
 - г) випалювальні печі, призначені для випалювання матеріалів. До них відносять печі для випалювання кераміки, вапна, цементного клінкеру, сірчаного колчедану тощо;
 - д) сушарки для видалення вологи з матеріалів чи для висушування пофарбованих виробів;
 - е) печі для одержання з одного продукту іншого шляхом його переробки. До них належать печі нафтопереробних заводів, печі для одержання штучного рідкого палива, коксові батареї для печей хімічної промисловості;
 - ж) печі хімічної промисловості для нагрівання матеріалів з метою проведення хімічних процесів.
2. За джерелом теплової енергії:
- а) полуменеві печі, в яких теплова енергія створюється за рахунок спалювання палива. Полуменеві печі, в свою чергу, діляться на печі, що працюють на твердому, рідкому, газоподібному паливі;
 - б) електричні печі, в яких нагрівання здійснюється за рахунок електроенергії. За використанням електричної енергії розрізняють електричні печі опору, дугові, індукційні, контактні, електронні, інфрачервоного нагріву.
3. За конфігурацією робочого простору:
- а) камерні печі, в яких матеріал в процесі нагрівання нерухомо лежить на піді. Температура робочого простору камерних печей у всіх точках простору майже однакова;
 - б) прохідні печі, в яких матеріал, поступово нагріваючись, переміщується від завантажувального до вивантажувального кінця. Температура теплоносія в певних точках робочого простору підтримується приблизно однаковою;
 - в) методичні печі, які мають робочий простір, витягнутий за довжиною. Нагрівання матеріалів у них здійснюється за принципом протитечії;
 - г) печі із висувним подом – камерні печі, в яких для зручності завантаження та вивантаження матеріалів під печі висувається;

- д) печі з обертовим подом або карусельні, в яких матеріал, що нагрівається, лежить нерухомо на поді, а під, обертаючись, переміщує його в робочому просторі;
- е) шахтні печі, які мають вертикальне розташування робочого об'єму, заповненого кусковим матеріалом. Матеріал у них завантажується зверху, а вивантажується знизу;
- ж) циліндричні обертові печі, які представляють собою обертовий циліндр (футерований всередині), розміщений під невеликим кутом. Матеріал поступово нагрівається, пересуваючись від верхнього завантажувального кінця до нижнього, де і вивантажується з печі;
- з) печі киплячого шару, в яких частинки матеріалу чітко визначених розмірів піднімаються струменем теплоносія на певну висоту, після чого опускаються і процес повторюється;
- и) циклонні печі, в яких матеріал нагрівається в завислому стані. Теплообмін здійснюється дуже інтенсивно;
- к) тунельні печі – печі з робочим простором у вигляді довгого каналу. Матеріал переміщується в печі на вагонетках.

Беручи до уваги наведену вище класифікацію, зрозуміло, що велика частина розглянутих теплових агрегатів характеризуються просторовою протяжністю і є класичними об'єктами з розподіленими параметрами. Моделювання та управління такими об'єктами є набагато складнішим, ніж у випадку із зосередженими параметрами і потребує подальшого дослідження.

Враховуючи широку конструктивну різноманітність теплових об'єктів з розподіленими параметрами, в цій роботі розглядається окремий клас таких об'єктів – теплотехнологічні об'єкти з розподіленими параметрами, описаний в наступному розділі.

Під теплотехнологічними об'єктами з розподіленими параметрами (ТОРП) в цій роботі будемо розглядати теплові установки неперервної дії, що характеризуються такими властивостями: неперервністю теплового процесу, розподілом температурного поля по довжині ОРП, розбиттям ТОРП на зони з можливістю окремого управління температурою на кожній з них, повздовжнім переміщення оброблюваного матеріалу, сталим часом його перебування на конкретній позиції

ТОРП та значним впливом етапу термічної обробки на характеристики якості кінцевої продукції.

Типовим прикладом ТОРП є прохідна нагрівальна піч довжиною L (рис.1.2), через яку неперервною смугою здійснюється переміщення матеріалу зі швидкістю v .

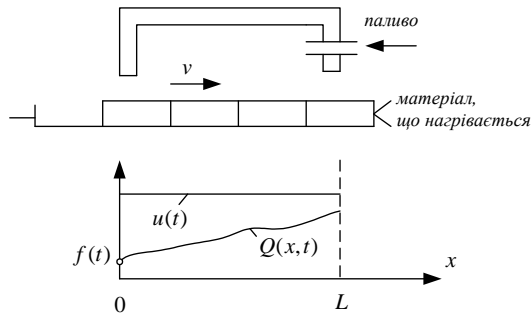


Рис. 1.2. Тепловий режим тунельної печі

По мірі повздовжнього просування від входу до виходу печі матеріал нагрівається під дією її температурного поля. Окремим випадком є рівномірне температурне поле печі, тобто в кожний момент часу t розподіл $u(t)$ температури в печі не залежить від координати x .

В цьому випадку розподіл температури смуги матеріалу, що нагрівається, задається функцією $Q(x, t)$. З [55] відомо, що функції $Q(x, t)$ і $u(t)$ пов'язані лінійним диференціальним рівнянням першого порядку в частинних похідних:

$$b \frac{\partial Q}{\partial t} + v \frac{\partial Q}{\partial x} = \alpha(u - Q),$$

де b – стала часу нагріву кожного перерізу матеріалу, перпендикулярного до осі x ; α – коефіцієнт теплообміну між температурним середовищем та матеріалом, що нагрівається.

Іншим прикладом, що розглядається в роботах [44, 61], є випадок, коли температурне поле печі не є рівномірним (теплообмінники). Такий клас теплових процесів протікає в печах випалювання, найбільш поширеними з яких є тунельні печі – теплові установки, в яких енергія для випалювання виділяється за рахунок згорання палива, а

садка виробів переміщується вздовж випалювального каналу назустріч газовому потоку.

Температурна крива складається із значень температури на окремих позиціях печі та характеризується температурною кривою випалювання (рис. 1.3).

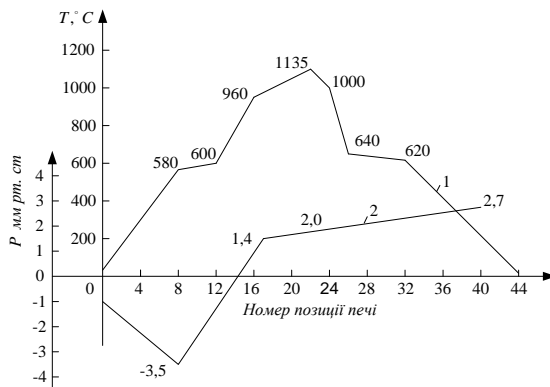


Рис. 1.3. Режими роботи тунельної печі: 1 – температурний режим; 2 – аеродинамічний режим

Переміщення газового середовища по каналу печі досягається завдяки розрідженню у відповідних зонах, яке характеризується кривою розрідження. Підтримання форми кривої температурного режиму здійснюється за допомогою вектора управління, що включає такі параметри: тиск та витрати природного газу; повітря для спалювання, охолодження, сушки; димові гази, що викидаються в атмосферу; інтервал проштовхування.

Таким чином, створення математичних моделей, засобів і методів моделювання, які б дозволили враховувати особливості ТОРП, враховуючи їх складність, є важливою запорукою їх ефективного функціонування, надійності, безпеки та якості продукції.

1.2. Задачі моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами

Актуальність та доцільність підвищення ефективності моделювання ТОРП зумовлені масштабами їх використання, великим промисловим значенням, широким колом задач моделювання.

Незважаючи на велику кількість задач моделювання теплотехнологічних ОРП, що розглядаються в роботах [15, 19, 30, 76, 83, 91, 117, 119], їх можна умовно поділити на такі:

1. В залежності від кількості просторових вимірів в [9, 17, 51, 118, 128] розглядаються такі задачі:

а) задача *моделювання одновимірного температурного розподілу*, що виникає при нагріванні виробів та передбачає варіювання значень температурного поля для отримання необхідного розподілу. Прикладом цього класу задач, розглянутих в роботах [15, 30, 75, 117, 140], є моделювання розподілу температурного поля пластини шириною $2S$, що описується функцією $Q(x, t)$ в часі t ($0 \leq t < T$) та за товщиною x ($-S \leq x \leq S$). В середині відрізка $[-S, S]$ при $t > 0$ цей розподіл описується лінійним диференціальним рівнянням в частинних похідних другого порядку:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності. Для однозначності розв'язку рівняння (1.1) вводяться граничні умови, наприклад:

$$\lambda \frac{\partial Q}{\partial x}(S, t) = \alpha_1 [u_1(t) - Q(S, t)], \quad t > 0, \quad (1.2)$$

$$-\lambda \frac{\partial Q}{\partial x}(-S, t) = \alpha_2 [u_2(t) - Q(-S, t)], \quad t > 0, \quad (1.3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; α_1 і α_2 – коефіцієнти теплообміну між тепловим середовищем печі та пластиною, $u_1(t)$ і $u_2(t)$ – температури середовища відповідно з однієї і другої сторони пластини.

б) задача *моделювання нагріву в загальному випадку*, розглянута в роботах [19, 33, 55], коли тіло має кінцеві розміри у всіх трьох просторових вимірах. Якщо позначити деяку область тривимірного простору, яку займає тіло, через D , а через G – поверхню, що обмежує D ,

то функція $Q(x, y, z, t)$ буде визначати розподіл температури в одно-
рідному тілі D та описуватися рівнянням теплопровідності:

$$\dot{Q} = \Delta Q, \quad (x, y, z) \in D, \quad t > 0, \quad (1.4)$$

з початковою умовою

$$Q(x, y, z, 0) = Q_0(x, y, z), \quad (1.5)$$

де Δ – оператор Лапласа в прямокутній системі координат:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1.6)$$

Прикладом цього класу задач є задача моделювання управляючих впливів вздовж деякого напрямку всередині області D . Наприклад, нагрів тіла D відбувається за допомогою тепла, яке виділяється електричним струмом, що проходить по провіднику всередині тіла D . Якщо провідник має форму кривої, рівняння якої можна задати параметрично:

$$x = x(\xi), \quad y = y(\xi), \quad z = z(\xi), \quad \xi_0 \leq \xi \leq \xi_1, \quad (1.7)$$

де ξ – параметр і $x(\xi_0)$, $y(\xi_0)$, $z(\xi_0)$, $x(\xi_1)$, $y(\xi_1)$, $z(\xi_1)$ – відповідно координати точок входу і виходу провідника з тіла D . Позначивши потужність, що виділяється струмом на одиницю довжини через $w(t)$, математичну модель процесу можна записати таким чином:

$$\dot{Q} = \Delta Q + w(t)\delta(x - x(\xi))\delta(y - y(\xi))\delta(z - z(\xi)). \quad (1.8)$$

Зазначимо, що оскільки не існує принципової різниці при моделюванні ОРП залежно від кількості просторових вимірів [12, 93], то в подальших прикладах і формулюваннях розглянуто випадок одно-
мірного розподілу, наведений вище.

2. *Задача моделювання заданого розподілу температурного поля*, як зазначено в [12, 28, 51, 75, 119], фактично є задачею оптимізації функціонування теплотехнологічних ОРП. В цьому випадку математична модель враховує обмеження, пов'язані з технологічними особливостями функціонування теплових агрегатів (температура та розміри робочого простору, калорійність палива тощо):

$$Q(x, T) = Q^*(x), \quad -S \leq x \leq S, \quad (1.9)$$

де T – деякий момент часу; $Q^*(x)$ – заданий або бажаний розподіл температури.

В залежності від *виду обмежень* в цьому класі можна умовно виділити такі групи задач:

а) задачі з *обмеженням на функцію стану* об'єкта: при недопустимості різких перепадів температури, зокрема градієнта температурного поля $Q(x, t)$ всередині тіла [17, 28, 31]:

$$|\text{grad}_x Q(x, t)| \leq A, \quad (1.10)$$

де A – задане стале число, що характеризує гранично допустиме максимальне або мінімальне значення температури в печі. Зауважимо, що в одновимірному випадку нерівність (1.10) відповідає обмеженню на частинну похідну по просторовій змінній:

$$\left| \text{grad}_x Q(x, t) \right| = \left| \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} \right| \leq A, \quad (1.11)$$

$$-S \leq x \leq S', \quad t \geq 0,$$

при недопустимості оплавлення поверхні матеріалу:

$$Q(S, t) \leq A, \quad Q(-S, t) \leq A, \quad t \geq 0, \quad (1.12)$$

де A – гранично допустима температура поверхні тіла, при якій не виникає оплавлення матеріалу.

б) задачі *моделювання динаміки управляючих впливів*, що виникають при великій інерційності процесу, пов'язані з обмеженнями на діапазон зміни управляючого органу.

3. В [15, 18, 30, 76, 78, 140] залежно від *виду математичного опису ТОРП* розглядаються такі групи задач:

а) математична модель ТОРП задана *лінійним рівнянням* виду (1.1);

б) математична модель ТОРП задана *нелінійним або неоднорідним рівнянням з коефіцієнтами*, що залежать від просторових координат або часу, виду:

$$c\rho \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial Q}{\partial x} \right], \quad (1.13)$$

де c – теплоємність; ρ – щільність; λ – теплопровідність, які можуть бути задані функціями x, t, Q .

4. В [17, 28, 30, 33, 79, 90] розглядаються задачі моделювання теплового розподілу, в яких основна увага приділена *хіміко-фізичним властивостям матеріалу*, що нагрівається. В цьому випадку до основного рівняння моделі, що описує тепловий розподіл, додається додаткове рівняння, яке описує відповідний хімічний процес. Прикладом цього класу моделей є:

а) задача моделювання заданого температурного розподілу при найменшому окисненні поверхні матеріалу (металу), розглянута в роботах [14, 15, 31, 58];

б) задача *моделювання цементації*, суть якої полягає у розподілі концентрації вуглецю для підвищення міцності сталі:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(c, Q) \frac{\partial c}{\partial x} \right], \quad (1.14)$$

де $Q = Q(x, t)$ – розподіл температури, $D(c, Q)$ – коефіцієнт дифузії вуглецю, що визначається з формули:

$$D(c, Q) = A + B(c) \exp \left[-\frac{kQ}{R} \right], \quad (1.15)$$

де A, k, R – сталі, що залежать лише від марки сталі, а $B(c)$ – відома функція від концентрації c .

в) задача *моделювання термонапруг*, що виникають всередині тіла при нагріванні, в якій крім розподілу температури, враховуються поля термонапруги $\sigma(x, t)$, які виступають в моделі у вигляді обмежень:

$$A \leq \sigma(x, t) \leq B, \quad -S \leq x \leq S, \quad t \geq 0. \quad (1.16)$$

5. В [12, 18, 28, 75, 118] розглядаються задачі *моделювання просторового переміщення* оброблюваних виробів або нагріваючих агентів. Якщо позначити розподіл температур агента, що нагріває, через $Q_1(x, t)$, а розподіл температур агента, що нагрівається, – $Q_2(x, t)$, тоді рівняння, що описує зміну $Q_1(x, t)$ в вибраній системі координат, буде мати вигляд:

$$\frac{\partial Q_1(x, t)}{\partial t} + v_1(x) \frac{\partial Q_1(x, t)}{\partial x} + \alpha_1(x) Q_1(x, t) = f_1(x, t), \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (1.17)$$

де $v_1(x)$ – швидкість руху агента, що нагріває, в додатному напрямку x ; $\alpha_1(x)$ – коефіцієнт теплообміну агента, що нагріває, з зовнішнім

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверкин А. Н. Мягкие вычисления и измерения / А. Н. Аверкин, С. В. Прокопчина // Интеллектуальные системы. – 1997. – № 2. – С. 93–114.
2. Айвазян С. А. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин – М. : Финансы и статистика, 1983. – 607 с.
3. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах / И. Л. Акулич. – М. : Высш. шк., 1986. – 319 с.
4. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
5. Андреев Д. А. Оптимизация температурного поля в открытых многокамерных системах / Д. А. Андреев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 3. – С. 145–162
6. Антонов О. В. Оптимальное управление технологическими процессами с использованием комбинированных математических моделей / О. В. Антонов, О. М. Проталинский // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 2. – С. 145–162.
7. Арутюнов В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. – М. : Металлургия, 1990. – 240 с.
8. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман – М. : Мир, 1979. – 536 с.
9. Бадамшин Р. А. Оптимальное терминальное управление системами с распределенными параметрами при неполном измерении их состояния / Р. А. Бадамшин, С. А. Горбатков, Е. А. Клестов – Уфа : УГАТУ, 1997. – 313 с.
10. Байрамов Ф. Д. Устойчивость и оптимальная стабилизация систем с распределенными параметрами / Ф. Д. Байрамов – М. : Машиностроение, 1995. – 154 с.

11. Бахвалов Н. С. Численные методы : учеб. пособие / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков – М. : Бинوم. Лаборатория знаний., 2008. – 636 с.
12. Бондарь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / А. Г. Бондарь. – К. : Вища школа, 1973. – 280 с.
13. Борисов А. Н. Принятия решений на основе нечетких моделей: примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.
14. Бояринов А. И. Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1975. – 276 с.
15. Булавацкий В. М. Некласичні математичні моделі процесів тепло- та масопереносу / В. М. Булавацкий, Ю. Г. Кривонос, В. В. Скопецкий. – К. : Наукова думка, 2005. – 284 с.
16. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 399 с.
17. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределёнными параметрами / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1975. – 568 с.
18. Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1977. – 320 с.
19. Бутковский А. Г. Характеристика систем с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1979. – 224 с.
20. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В. А. Вознесенский. – К. : Вища школа, 1989. – 328 с.
21. Володарский Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е. Т. Володарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – К. : Вища школа, 1987. – 280 с.
22. Воронов А. А. Теория автоматического управления. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А. А. Воронов. – М. : Высш. школа, 1977. – 288 с.
23. Высокотемпературные технологические процессы и установки / под ред. Лисиенко В. Г. – Минск : Высшая школа, 1988. – 320 с.
24. Гайдышев И. П. Анализ и обработка данных. Специальный справочник / И. П. Гайдышев. – СПб. : “Питер”, 2001. – 752 с.

25. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
26. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов. 9-е изд., / В. Е. Гмурман. – М. : “Высш. школа”, 2003. – 479 с.
27. Годунов С. К. Элементы механики сплошных сред и законы сохранения / С. К. Годунов, Е. И. Роменский. – Новосибирск.: Научная книга, 1998. – 280 с.
28. Голінко І. М., Моделювання динамічного режиму підзони випалювання / І. М. Голінко, Ю. О. Остапенко // Автоматизація виробничих процесів. – 1999. – № 1/2. – С. 40–44.
29. Грин. Д. Математические методы анализа алгоритмов / Д. Грин, Д. Кнут. – М. : Мир, 1987. – 120 с.
30. Грубов В. И. Математическое моделирование непрерывных технологических процессов / В. И. Грубов. – К. : Изд-во Киев. ун-та, 1971. – 174 с.
31. Гущин С. Н. Моделирование и управление тепловой работой стекловаренных печей / С. Н. Гущин, В. Г. Лисиенко, В. Б. Кутин. – Екатеринбург : УГТУ, 1997. – 398 с.
32. Дарьин Н. А. Математическое моделирование нестационарных двумерных краевых задач на сетках с динамической адаптацией / Н. А. Дарьин, В. И. Мажукин // Математическое моделирование. – 1989. – Т. 1, № 3. – С. 29–43.
33. Демиденко Н. Д. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, В. И. Потапов, Ю. И. Шокин. – Новосибирск : Наука, 2006. – 551 с.
34. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 954 с.
35. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1987.– 726 с.
36. ДСТУ Б В.2.7-42-97. Строительные материалы. Методы определения водопоглощения, плотности и морозостойкости строительных материалов и изделий. – Взамен ГОСТ 7025-91, ТУ 21 Украина 525-92; Введ. 01.07.97. – К. : Государственный комитет

- Украины по делам градостроительства и архитектуры, 1997. – 27 с.
37. ДСТУ Б В.27-61-97.Строительные материалы. Кирпич и камни керамические рядовые и лицевые. Технические условия. – Взамен ГОСТ 530-80; Введ. 01.01.98. – К. : Государственный комитет Украины по делам градостроительства и архитектуры, 1997. – 31 с.
 38. Дубовой В. М. Моделювання систем контролю та керування. Навчальний посібник / В. М. Дубовой. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 176 с.
 39. Дубовой В. М. Прийняття рішень в умовах змішаної невизначеності / В. М. Дубовой, Д. О. Ковалюк, О. О. Ковалюк. // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2003. – № 6. – С. 23–29.
 40. Дубров А. М. Обработка статистических данных методом главных компонент / А. М. Дубров. – М. : Наука 1978. – 131 с.
 41. Евдокимов А. Г. Минимизация функций и ее приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями / А. Г. Евдокимов. – Харьков : Вища шк., 1985. – 288 с.
 42. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Ю. Г. Евтушенко. – М. : Наука, 1982. – 432 с.
 43. Еременко Ю. И. Схема интеллектуального управления металлургическими процессами на основе контроллера с нейросетевой самонастройкой / Ю. И. Еременко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 5. – С. 21–26.
 44. Жученко А. І. Оптимальне керування процесом випалювання керамічної цегли / А. І. Жученко, І. В. Ярошук // Автоматизація виробничих процесів. – 2002. – № 2(15). – С. 45–50.
 45. Зайченко Ю. П. Многокритериальные задачи принятия решений в нечётких условиях и методы их решения / Ю. П. Зайченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2002. – № 2. – С. 53–62.

46. Захаров И. П. Теория неопределенности в измерениях : учеб. пособие / И. П. Захаров, В. Д. Кукуш – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.
47. Згуровский М. З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования / М. З. Згуровский. – К. : Вища школа, 1990. – 351 с.
48. Згуровский М. З. Системный анализ стохастических распределенных процессов: (Моделирование, оценивание состояний, идентификация) / М. З. Згуровский, А. Н. Новиков. – Киев : УМКВО, 1988. – 204 с.
49. Золотарский А. З. Производство керамического кирпича / А. З. Золотарский, Е. Ш. Шейман. – М. : Высш. шк., 1989. – 263 с.
50. Ибрагимова Д. М. Компьютерная программа оценки качества глинистого сырья и прогнозирования свойств керамического кирпича / Д. М. Ибрагимова, Б. Ф. Горбачев, А. В. Корнилов // Стекло и керамика – 2005. – № 9. – С. 43–46.
51. Иваненко В. И. Вариационные методы в задачах управления для систем с распределенными параметрами / В. И. Иваненко, В. С. Мельник. – К : Наук. думка, 1988. – 288 с.
52. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование управления сложными системами / А. Г. Ивахненко. – К. : Техника, 1975. – 312 с.
53. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрячковский. – М. : Радио и связь, 1987. – 120 с.
54. Измерения в промышленности: Справочник / под ред. П. Профоса. – М. : Металлургия, 1990. – 384 с.
55. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 413 с.
56. Иващук В. В. Структура системи керування складним об'єктом з використанням математичних моделей / В. В. Иващук, А. П. Ладанюк // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 1. – С. 56–58.

57. Карауш С. А. Критерии управления тепловыми режимами при обжиге керамических изделий / С. А. Карауш // Стекло и керамика. – 1998. – № 5. – С. 3–5.
58. Карауш С. А. Управление тепловыми режимами обжига в печах с излучающими стенами / С. А. Карауш, Е. Г. Боберъ // Стекло и керамика. – 1998. – № 11. – С. 20–22.
59. Кветний Р. Н. Методи комп'ютерних обчислень. Навчальний посібник / Р. Н. Кветний. – Вінниця : ВДГУ, 2001. – 148 с.
60. Кини Р. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Кини, Х. Райфа. – М. : Радио и связь, 1981. – 560 с.
61. Ключников А. Д. Теплообмен и тепловые режимы в промпечах / А. Д. Ключников, В. Н. Кузьмин, С. К. Попов. – М. : Энергоиздат, 1990. – 175 с.
62. Ковалюк Д. О. Алгоритм прийняття рішень в умовах ризику в великих системах / Д. О. Ковалюк, С. М. Москвіна // Проблеми інформатизації та управління: Зб. наук. праць. – Київ, 2004. – № 11. – С. 135–139.
63. Кондратенко В. А. Керамические стеновые материалы: оптимизация их физико-технических свойств и технологических параметров производства / В. А. Кондратенко. – М. : Композит, 2005. – 512 с.
64. Корольов С. В. Модели и алгоритмы идентификации в системах управления непрерывно действующими объектами / С. В. Корольов, Э. Б. Абуталиев, У. Ш. Булишев. – Ташкент : Фан, 1990. – 72 с.
65. Кочетов В. С. Автоматизация производственных процессов и АСУТП промышленности строительных материалов / В. С. Кочетов, А. А. Ларченко, Л. Р. Немировский. – Л. : Стройиздат, 1981. – 456 с.
66. Красовский А. А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / А. А. Красовский, В. Н. Буков, В. С. Шендрик. – М.: Наука, 1977. – 272 с.

67. Кроу К. Математическое моделирование химических производств / К. Кроу, А. Гамилец, Т. Хоффман. – М. : Мир, 1973. – 392 с.
68. Кудинов Ю. И. Адаптивный нечеткий регулятор температуры отжига стали в электрической колпаковой печи / Ю. И. Кудинов, И. Ю. Кудинов, А. Ю. Келина // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 9. – С. 145–162.
69. Кузьмин И. В. Основы моделирования сложных систем : учеб. для вузов / И. В. Кузьмин. – К. : Вища шк., 1981. – 359 с.
70. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления / И. В. Кузьмин. – М. : Сов. радио, 1971. – 296 с.
71. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В. М. Кунцевич. – К. : Наук. думка, 2006. – 264 с.
72. Ладанюк А. П. Управление технологическими комплексами в компьютерно-интегрированных системах / А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, В. Д. Кишенько // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 2. – С. 72–79.
73. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах / О.И. Ларичев. – М. : Логос, 2003. – 392 с.
74. Лисенко В. Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах / В. Г. Лисенко, В. В. Волков, А. Л. Гончаров. – К. : Наукова думка, 1984. – 232 с.
75. Лемешко Б. Ю. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко // Метрология. – 2005. – № 2. – С. 3–23.
76. Лисиенко В. Г. Моделирование объектов с распределенными параметрами на примере трехуровневых АСУ нагревом материала : учеб. пособие для вузов / В. Г. Лисиенко, З. Г. Салихов, О. А. Гусев. – Екатеринбург : Урал. гос. техн. ун-т–УПИ, 2004. – 254 с.

77. Лисогор В. М. Моделі керування технологічними процесами в аварійних ситуаціях / В. М. Лисогор, Р. В. Селезньова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1997. – 95 с.
78. Лук'яненко С. О. Адаптивний метод розв'язування двовимірних рівнянь теплопровідності / С.О. Лук'яненко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – К. : 2003. – Вип. 21. – С. 126–135.
79. Лукин Е. С. Технический анализ и контроль производства керамики / Е. С. Лукин. – М. : Стройиздат, 1986. – 272 с.
80. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1982. – 224 с.
81. Ляшко И. И. Методы вычислений / И. И. Ляшко, В. Л. Макаров, А. А. Скоробагатько. – К. : Наукова думка, 1991. – 264 с.
82. Ляшко С. И. Приближенное решение задач управления с операторным коэффициентом гиперболического типа / С. И. Ляшко. – К. : ИК, 1982. – 132 с.
83. Ляшко С. И. Градиентные методы в задачах оптимального импульсного управления для систем с распределенными параметрами / С. И. Ляшко, А. А. Маньковский. – К. : ИК, 1983. – 54 с.
84. Макино Т. Контроль качества с помощью персональных компьютеров / [Под. ред. Ю. П. Адлера]. – М. : Машиностроение, 1991. – 224 с.
85. Марчук Г. И. Методы расщепления / Г. И. Марчук. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 264 с.
86. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 608 с.
87. Медведєв В. С. Нейронные сети. MATLAB 6. / В. С. Медведєв, В. Г. Потемкин – М. : ДИАЛОГ- МИФИ, 2002. – 496 с.
88. Митюшкин Ю.И. Soft-Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.

89. Михальов О. І. Синтез та адаптація параметрів пошукових методів ідентифікації нелінійних систем / О. І. Михальов, А. І. Гуда // Вісник ВПІ. – 2001. – № 6(39). – С. 55–58.
90. Мізерний В. М. Аналіз динамічних режимів теплообмінних процесів у дисперсному шарі / В. М. Мізерний, Т. А. Модебадзе // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2007. – № 3. – С. 98–105.
91. Мізерний В. М. Моделювання процесу нелінійного теплообміну двофазних середовищ / В. М. Мізерний, Т. А. Модебадзе // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2006. – № 3. – С. 61–75.
92. Мокін Б.І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів : навчальний посібник / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 300 с.
93. Молчанов И. Н. Машинные методы решения прикладных задач. Дифференциальные уравнения / И. Н. Молчанов. – К. : Наук. думка, 1988. – 235 с.
94. Москвіна С. М. Моделювання теплових об'єктів на базі інтелектуальних технологій / С. М. Москвіна, С. А. Білоконь // Вісник Хмельницького національного університету – 2007. – № 3. – С. 22–26.
95. Москвіна С. М. Інтелектуальна система управління якістю продукції в печах випалювання / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // ІНТЕРНЕТ–ОСВІТА–НАУКА–2006 : V Міжнар. конференція, 10–14 жовтня, 2006 р. : тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 637–640.
96. Москвіна С. М. Математична модель прийняття рішень в умовах ризику в системах управління технологічним процесом / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2005. – № 1. – С. 214–219.
97. Москвіна С. М. Моделювання процесу випалювання цегли / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2005. – № 6. – С. 62–68.
98. Москвіна С. М. Оптимізація управління в печах випалювання / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – № 1. – С. 31–34.

99. Москвіна С. М. Управління тепловими процесами на основі нейро-нечітких моделей / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк, С. А. Білонь // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 202–206.
100. Москвіна С. М. Система прийняття рішень в управлінні технологічним процесом виготовлення цегли / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Системний аналіз та інформаційні технології : VII Міжнар. науково-технічна конференція, 28 черв.– 2 липн., 2005 р. : тези доп. – К., 2005. – С. 131.
101. Москвіна С. М. Проблеми оптимізації управління технологічним процесом виготовлення цегли / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 5. – С. 121–125.
102. Москвіна С. М. Математична модель енергозбереження теплового об'єкту з розподіленими параметрами / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №4. – С. 15–19.
103. Москвіна С. М. Комп'ютерна програма прийняття рішень в умовах ризику для керування роботою печі по випалюванню вапна / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №12503 від 17 березня 2005 р.
104. Москвіна С. М. Засіб моделювання поведінки систем контролю і керування нелінійними нестационарними об'єктами С. М. Москвіна, С. В. Юхимчук, Ю. В. Поремський // Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” – 2003. – № 4(30). – С. 64–69.
105. Муромцев Д. Ю. Энергосберегающее управление сложными объектами / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 11. – С. 145–162.
106. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
107. Новоселов А. А. Неприятие риска: качественный подход и количественные оценки / А. А. Новоселов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 165–177.

108. Основы моделирования сложных систем: учеб. для вузов / под ред. И. В. Кузьмина. – К. : Вища шк., 1981. – 359 с.
109. Остапенко Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування / Ю. О. Остапенко. – К. : Задруга, 1999. – 424 с.
110. Остапенко Ю. О. Керування температурним полем тунельної печі в умовах нестабільності складу шихти / Ю. О. Остапенко, І. В. Ярошук // Автоматизація виробничих процесів. – 2001. – №1(12). – С. 14–18.
111. Перельман И. И. Оперативная идентификация объектов управления / И. И. Перельман. – М. : Энергоиздат, 1982. – 272 с.
112. Проект “Реконструкция туннельной печи №3 ОАО “Керамик” г. Винница. Автоматизация. Книга № 4”. – Винница, 2004.
113. Проурзин В. А. Алгоритмы анализа и оптимизации технико-экономического риска при проектировании сложных систем / В. А. Проурзин // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 41–50.
114. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – М. : Наука, 1968. – 288 с.
115. Райниш К. Кибернетические основы и описания непрерывных систем. – М. : Энергия, 1978. – 456 с.
116. Ралко А. В. Тепловые процессы в технологии силикатов / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников. – К. : Вища школа, 1986. – 232 с.
117. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. – М. : Высшая школа, 2003. – 298 с.
118. Рапопорт Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. – М. : Высш. шк., 2005. – 292 с.
119. Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. – М. : Мир, 1983. – 367 с.
120. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии в идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : Континент-ПРИМ, 1999. – 300 с.

121. Ротштейн А. П. Идентификация нелинейных зависимостей нечеткими базами знаний / А. П. Ротштейн, Д. И. Кательников // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – №5. – С. 53–61.
122. Ротштейн А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. Винница : Континент-ПРИМ, 1997. – 142 с.
123. Рыбаков А. В. Оптимизация в задачах идентификации логико-вероятностных моделей риска / А. В. Рыбаков, Е. Д. Соложенцев // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 51–63.
124. Рябинин И. А. Логико-вероятностное исчисление как аппарат исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 178–185.
125. Самарский А. А. Численные методы математической физики / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Научный мир, 2009. – 480 с.
126. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М. : Мир, 1980. – 456 с.
127. Серегин М. Ю. Системы управления объектами химической технологии в условиях неопределенности / М. Ю. Серегин. – М. : Машиностроение, 1999. – 88 с.
128. Скопецкий В. В. Математичне моделювання прямих та обернених задач динаміки систем з розподіленими параметрами / В. В. Скопецкий, В. А. Стоян, Ю. Г. Кривonos. – К. : Наукова думка, 2002. – 361 с.
129. Соложенцев Е. Д. Особенности логико-вероятностной теории риска с группами несовместных событий / Е. Д. Соложенцев // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №7. – С. 187–203.
130. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике / Е. Д. Соложенцев. – СПб. : Издательский дом “Бизнес-пресса”, 2006. – 530 с.
131. Статистические методы повышения качества / под ред. Х. Куме. – М. : Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
132. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова – М. : Энергия, 1973. – 296 с.

133. Технологічний регламент виробництва керамічних каменів та цегли на заводі керамічних стінових матеріалів. Затв. директором комбінату будівельних матеріалів. – К., 1994. – 63 с.
134. Титов В. С. Выбор оптимальных параметров управления технологическим процессом методами нечеткой логики / В. С. Титов, С. С. Тевс, М. В. Бобырь // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – № 5. – С. 145–162.
135. Тихи О. Обжиг керамики / О. Тихи; под ред. Л. В. Соколовой. – М. : Стройиздат, 1988. – 344 с.
136. Тюрин И. В. Информационная система идентификации моделей многозонных электрических печей / И. В. Тюрин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 31–33.
137. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
138. Хаммельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Хаммельблау. – М. : Мир, 1975. – 534 с.
139. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М. : Мир, 1977. – 552 с.
140. Шевяков А. А. Управление тепловыми объектами с распределенными параметрами / А. А. Шевяков, Р. В. Яковлева. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 206 с.
141. Шигин Е. К. Классификация динамических моделей объектов регулирования химико-технологических процессов / Е. К. Шигин // Автоматика и телемеханика. – 1968. – № 6. – С. 145–162.
142. Шлегель И. Ф. Скоростной обжиг кирпича – миф или реальность? / И. Ф. Шлегель // Строительные материалы. – 2004. – № 4. – С. 23–26.
143. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [электроний ресурс] / С. Д. Штовба. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
144. Штовба С. Д. Запобігання втрати прозорості нечітких моделей під час навчання за експериментальними даними / С. Д. Штовба // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 39–45.

145. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 683 с.
146. Эрэнберг А. Анализ и интерпретация статистических данных / А. Эрэнберг; под ред. А. А. Рывкина. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 406 с.
147. Юхимчук С. В. Математичні моделі ризику для систем підтримки прийняття рішень / С. В. Юхимчук, А. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2003. – 188 с.
148. Ahola, T., Kumpula H., Juuso E. Prediction of paper machine runnability by identification of operating situations. In: Proceedings of AFNC'04 - the 2nd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural, September 16-17, 2004, Oulu, Finland (K. Leiviskä, Ed.). pp. 205–210. Finnish Automation Society.Helsinki.
149. Ali Y.M., Zhang L. A methodology for fuzzy modeling of engineering systems // Fuzzy Sets and Systems. – 2001. – No. 118. – P. 181–197.
150. Allison, B., Ball, J. “Cascaded Model Predictive Control of a Rotary Lime Kiln”, Paptac 88th Annual Meeting., 2002, pp. 159–164.
151. Bo Y., Yi L, Shouning Q. (1997). A rule based cement kiln control system using neural networks. In: Proceedings of Intelligent Processing Systems, Beijing. Vol. 1. pp. 493–497. IEEE.
152. Buckley J.J. Sugeno-type controller are universal controllers // Fuzzy Sets and Systems. – 1993. – No. 53. – P. 299–303.
153. Case Study: Design of a Fuzzy Controller using MATLAB.
154. Castro J.J., Doyle F.J., Kendo T. (2001). Mathematical model for simulation and control of rotary lime kilns. Pulp and Paper Canada 102, pp. 48–51.
155. Dias F.M., Antunes A., Mota A.M. Additive internal model control: an application with neural models in a kiln // IEEE. – 2002. – № 2. – P. 1612–1617.
156. Didriksen H. Model Based Predictive Control of a Rotary Dryer, Chemical Engineering Journal, vol. 86, pp. 53–60, 2002.

157. Elgeliel M. A. Model reference based supervisory fuzzy logic controller for process control // ISTAD MIC 2003 : Conference, Feb. 10–13, 2003.
158. Elgeliel M. A. Supervisory Fuzzy Logic Controller used for Process Loop Control in DCS System, CCA03 Conference, Istanbul, Turkey, June 23/25, 2003.
159. Han-Xiong Li, Shouping Guan. Hybrid Intelligent Control Strategy // IEEE Control System Magazine. – June 2001. – P. 36–48.
160. Jantzen, J., Poulsen N. K. (2003). Adaptation in the fuzzy self-organizing controller. In: Proceedings of Eunite 2003 – European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems, July 10-11, 2003, Oulu, Finland. pp. 49–57. Wissenschaftsverlag Mainz. Aachen.
161. Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E. Applied Interval Analysis. // Springer – Verlag London Limited 2001.– 379 p.
162. Juuso, E. K. (2004e). Integration of intelligent systems in development of smart adaptive systems. International Journal of Approximate Reasoning 35, pp. 307–337.
163. Ko H.S., Kim J.S., Yoon T.W. Modeling and Predictive Control of a Reheating Furnace, Proceedings of American Control Conference, 2002, pp. 2725–2729.
164. Lingl-Information 95/97. Manager-Info-System (MIS) fur die Keramische Baustoff-Industrie. – 1997. – 45p.
165. Mathworks Inc. Fuzzy logic toolbox users guide for use with Matlab. Version 2, PDF document, 1998.
166. Moon U.C. and Lee K.Y., “Multi-Loop Control of Temperature for TV Glass Furnace”, Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, December 2000.
167. Naeini A.E. Modeling and Control of Distributed Thermal Systems / Naeini A.E., Ebert J.L., Roover D., Kosut R.L., Dettori M., Porter L., Ghosal S. // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2003. – Vol. 11, №5.
168. Nauck D., Klawonn F., Kruse R. Foundation of Neuro-Fuzzy Systems. - John Willey & Sons. - 1997. – 305 p.

Наукове видання

**Ковалюк Дмитро Олександрович
Москвіна Світлана Михайлівна**

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ
ОБ'ЄКТІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено Д. Ковалюком

Підписано до друку 12.01.10 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 10,47.
Наклад 100 прим. Зам № 2010-003.

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.