

УДК 519.876.2

Д. О. Ковалюк, к. т. н.; С. М. Москвіна, к. т. н., доц.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

*В статті розглянуто проблеми моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами та запропоновано методи підвищення їх ефективності за рахунок поєднання кінцево-різницевої та нечітких моделей. Проблеми моделювання розглянуто в контексті задач управління якістю продукції.*

**Ключові слова:** *теплотехнологічні об'єкти, кінцево-різницеві методи, нечіткі моделі, управління якістю продукції.*

### Вступ

Процеси теплової обробки є важливою складовою багатьох промислових виробництв в енергетиці, металургії, хімії. Для функціонування таких процесів використовуються різноманітні теплові установки та агрегати, окремим класом яких є теплотехнологічні об'єкти з розподіленими параметрами (ТОРП), що характеризуються наступними 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.

### Проблеми моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами

Зазначимо, що математична модель теплотехнологічного ОРП є функціональною залежністю виду  $T = F(X, U, L, t)$  і дозволяє визначити значення температурного поля  $T$  теплотехнологічного об'єкту (або матеріалу) в момент часу  $t$  в точці  $L$  при відповідному наборі значень параметрів  $X$  теплотехнологічного об'єкту та керуючих впливах  $U$ . Задача оптимального управління теплотехнологічним ОРП полягає у підтриманні відповідної температурної кривої, тобто в результаті моделювання визначають такі значення вектора управління  $U$ , при яких значення вектора  $T$  максимально наближені до відповідних еталонних значень температурної кривої, такої, як наведено на рис. 1.

Аналіз математичних моделей ТОРП [1-3] показав, що їх використання є цілком виправданим та перевіреном на практиці. Проте існуючі моделі не дозволяють забезпечити максимальну ефективність процесів теплової обробки, яка визначається співвідношенням між витратами та якістю кінцевої продукції. Типовим прикладом є випадки отримання низької якості виробів з високими (сталими) енергетичними витратами. Основною причиною є те, що існуючі моделі не враховують факторів всього технологічного процесу, починаючи від формування виробів і закінчуючи показниками якості продукції, а тому не можуть оперативно реагувати (перенастроювати параметри процесу) на збурюючі впливи.

*Метою роботи* є вдосконалення методу моделювання ТОРП за допомогою інтелектуальної складової моделі об'єкту і алгоритму визначення оптимальних параметрів моделі ОРП, що дозволяє підвищити його швидкодію.

Підвищення ефективності моделювання ТОРП розглядається на прикладі тунельної печі випалювання цегли, температурне поле якої представлено на рис. 1.

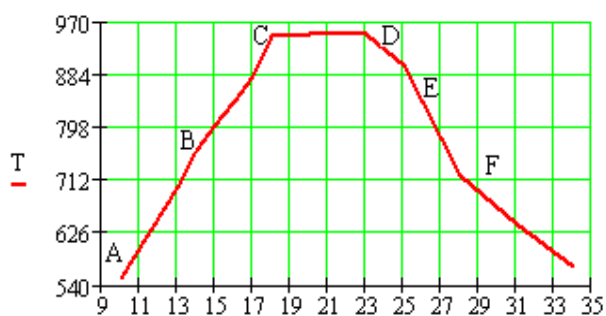


Рис. 1. Крива температурного режиму теплотехнологічного ОРП

У більшості випадків для отримання вектора температур  $T$  від рівняння в частинних похідних, що описує функціонування теплотехнологічного ОРП, переходять до системи кінцево-різницевих рівнянь та використовують чисельний метод кінцевих різниць. Точність і адекватність результатів цього методу залежить від стійкості різницевої схеми, на яку впливають співвідношення кроків за часом та просторової змінної, кількості змінних, тип різницевої схеми.

Оскільки забезпечення стійкості різницевої схеми впливає на трудомісткість розв’язання різницевої задачі, то для визначення ефективності кінцево-різницевого методу було проведено дослідження одно-, дво- та тривимірних моделей ОРП, яке здійснювалося шляхом варіювання параметрів сітки, використання явних та неявних схем, обчислення максимальної відносної похибки між реальними та розрахованими значеннями, трудомісткості операцій.

Таблиця 1

**Результати моделювання теплотехнологічних ОРП**

Кількість параметр. моделі	Схема	Крок по часу, $\tau$	Час розрахунку, (сек.)	Порядок трудомісткості, (к-сть операцій)	Максим. відносна похибка, (%)
одновимірна	явна	0,001	2,4	$10^4$	0,708
	неявна	0,01	2,15	$10^4$	0,798
	неявна	0,001	42,172	$10^5$	0,759
	неявна	0,0001	1024,21	$10^6$	0,638
двовимірна	явна	0,01	17,8458	$10^4$	1,618
	неявна	0,001	8267,22	$10^6$	2,996
тривимірна	неявна	0,001	48672,2	$10^{11}$	14,21

Аналіз результатів моделювання, наведених у таблиці 1, показав, що ефективність кінцево-різницевих методів суттєво залежить від розмірності моделі теплотехнологічного ОРП та значень параметрів моделювання – розміру кроку дискретизації по часу та просторовим змінним, зменшення яких для забезпечення заданої точності розв’язання та збіжності різницевої схеми приводить до великих затрат машинних ресурсів та ускладнює використання даних моделей в існуючих системах управління, працюючих в реальному масштабі часу.

Враховуючи істотну обернену залежність трудомісткості методу кінцевих різниць від кроку дискретизації, його застосування на ділянках, температурне поле теплотехнологічного ОРП яких можна розглядати як стале (рис. 1, ділянка  $CD$ ), не є доцільним. Тому авторами запропоновано комбінований метод моделювання теплотехнологічного ОРП, використання якого дозволяє підвищити швидкість моделювання.

**Алгоритм методу моделювання теплотехнологічних ОРП**

Суть методу полягає в тому, що для моделювання температурного поля ОРП використовуються різні моделі, вибір яких зумовлюється градієнтом температурного поля на відповідній позиції ОРП. Алгоритм методу містить наступні кроки:

1. Визначається температура на початку –  $T^0$  та в кінці –  $T^k$  відповідної позиції теплотехнологічного ОРП.

2. Якщо  $|T^k - T^0| > \xi$ , (де  $\xi$  – задане допустиме відхилення), то для розподілу температури даної позиції виконуються умови  $\left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \geq G_T; \frac{\partial T}{\partial l} \leq G_L \right.$  (де  $G_T, G_L$  – задані межі зміни температури по часу і довжині). У цьому випадку:

2.1) використовуються положення теорії теплопровідності для побудови математичної моделі розподілу температурного поля, та здійснюється її дискретизація з необхідною точністю;

2.2) використовуючи значення  $T^0, T^k$ , формулюється змішана задача з відповідними початковими та граничними умовами;

2.3) застосовується метод кінцевих різниць для чисельного розв'язання змішаної задачі.

3. Якщо  $|T^k - T^0| \leq \xi$ , то для моделювання температурного розподілу такої позиції (рис.1, ділянка  $CD$ ):

3.1) позиція теплотехнологічного ОРП розглядається як об'єкт із зосередженими параметрами;

3.2) використовується нечітка математична модель даної позиції у вигляді ОЗП, з подальшим її розв'язанням відносно  $U$ .

### Нечітка модель процесу випалювання

В якості моделі теплового об'єкта з розподіленими параметрами авторами запропоновано нечітку модель, оскільки моделі даного класу [4-5] є відносно нескладними і придатними для використання в існуючих АСУТП, що працюють в реальному масштабі часу. Для розробки нечіткої моделі управління проведено аналіз факторів, що впливають на температури позицій печі. Використовуючи математичну модель температурного поля позиції печі, основу на рівняннях теплового балансу, для моделі відібрано фактори, що характеризують умови протікання теплових процесів на поточній та попередній позиції, а також враховують рух повітря вздовж печі:  $x_1$  – абсолютне відхилення температури  $T$  від заданої  $T_s$  на поточній позиції печі;  $x_2$  – швидкість зміни температури;  $x_3$  – теплотворна здатність палива;  $x_4$  – температура повітря попередньої зони;  $x_5$  – кількість повітря, що виноситься в наступну позицію;  $x_6$  – витрати палива на поточній позиції;  $x_7$  – температура матеріалу в поточній зоні. В якості структури моделі обрано ієрархічне дерево, що дозволяє зменшити кількість правил у базі знань.

Адекватність нечіткої моделі підтверджена результатами експериментальних досліджень, які показали, що середня квадратична нев'язка моделі складає 9,64. Результати дослідження точності моделі наведені на рисунку 2, де  $T_{mod}$  – значення температури, отримане за допомогою нечіткої моделі,  $T_{real}$  – експериментальне значення температури,  $T_z \pm d$  – допустимі відхилення

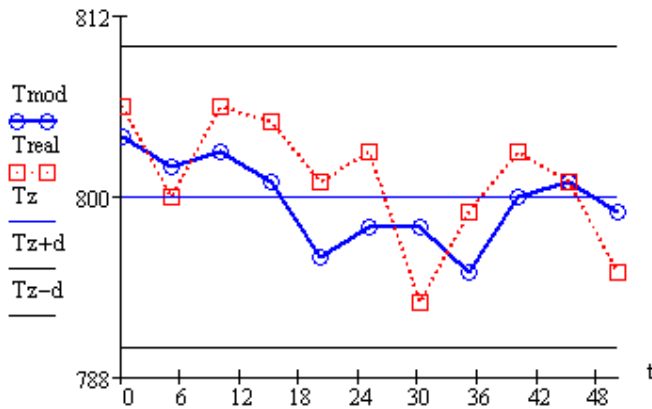


Рис. 2. Дослідження точності нечіткої моделі

температури за технологічним регламентом. Час розрахунку параметрів управління  $V$  для отримання заданого значення температури становить 1,5 с.

Результати моделювання показали, що запропонований в роботі метод моделювання теплотехнологічних ОРП у порівнянні з даними таблиці 1, дозволяє суттєво підвищити швидкість моделювання за рахунок використання нечіткої моделі на позиціях, для температурного розподілу яких виконується співвідношення  $|T^k - T^0| \leq \xi$ .

### Алгоритм оптимізації параметрів моделі ТОРП

Для врахування особливостей всього технологічного процесу в роботі запропоновано метод визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного ОРП (рис. 3), необхідність якого пов'язана з тим, що існуючі моделі не враховують факторів всього технологічного процесу, збурюючих впливів, пов'язаних зі зміною температури і вологості повітря, властивостей сировини, відхиленнями у підготовці напівфабрикату виробів, а тому не дозволяють адекватно описувати ОРП при різних умовах.

Ідея методу [6] полягає в тому, що використовуючи значення факторів ТП, необхідно спрогнозувати максимально можливий клас якості продукції і знайти оптимальні в сенсі енергетичних витрат значення температурного поля, при яких досягається заданий клас якості.

Метод визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного ОРП (рис. 3) працює за алгоритмом, що включає наступні етапи:

1. Прогнозування максимально можливого класу якості продукції, що здійснюється з використанням логіко-імовірнісної моделі (блок "ЛІ-модель визначення класу продукції", рис. 3), яка дозволяє визначити клас якості з врахуванням ризику прийняття рішення, що зумовлено складністю та аварійністю об'єкта, значною інерційністю каналів управління, розподілом температури газового середовища вздовж випалювального каналу.

2. Знаючи максимально можливий клас якості, знаходиться нижня межа для даного класу та з використанням моделі всього технологічного процесу (блок "Модель прогнозування якості"), моделі оптимізації (блок "Модель оптимізації") та обмежень технологічного регламенту відносно значень температурного поля  $\mathbf{T}$ , розв'язується задача оптимізації:

$$f(\mathbf{T}(\mathbf{U})) \rightarrow \min, \tag{1}$$

$$\begin{cases} MM\_Class(\mathbf{H}, \mathbf{T}) = Class_{max}; \\ MM\_Mitsnist(\mathbf{H}, \mathbf{T}) = M_{min}|_{CLASS_{max}}; \\ \mathbf{W}_{min} \leq \mathbf{W} \leq \mathbf{W}_{max}, \end{cases} \tag{2}$$

де  $f(\mathbf{T}(\mathbf{U}))$  – критерій ефективності, що враховує зв'язок між температурою та енергетичними витратами для її підтримання;  $MM\_Class$  – математична модель класифікації якості виробів;  $MM\_Mitsnist$  – математична модель якості продукції ТП;  $\mathbf{H}$  –

вектор параметрів підготовчих етапів ТП, що передують ОРП;  $W_{\min}$ ,  $W_{\max}$  – межі технічних параметрів системи керування.



Рис. 3. Структурна схема методу визначення оптимальних параметрів ОРП

3. Уточнені параметри моделі теплотехнологічного ОРП –  $T_{орт}$ , отримані на попередньому кроці, використовуються в моделі теплотехнологічного ОРП (блок “Модель ТТОРП”, рис. 3) для моделювання температурного поля об’єкта управління та реалізуються блоком управління.

4. У випадку неможливості підтримання розрахованої температурної кривої з технічних причин (наприклад, зміна режиму проштовхування виробів, вихід з ладу пальників на окремих позиціях), в методі передбачена можливість оперативного коригування температурного поля за допомогою моделі коригування температурного поля (блок “Модель коригування температури”), на вхід якої, крім параметрів попередніх етапів ТП, надходять значення температурного поля, що були отримані до даної позиції.

5. Після завершення ТП визначається реальна якість продукції  $Q_{реал}$  (блок “Визначення якості”, рис. 3), що порівнюється з прогнозованою якістю  $Q_{прогн}$ . У випадку, якщо  $|Q_{реал} - Q_{прогн}| > \Delta Q_{гран}$  (де  $\Delta Q_{гран}$  – гранично допустиме відхилення моделі якості), то виконується процедура коригування нейромережевої [3] моделі прогнозування якості (блок “Уточнення моделі прогнозування якості”, рис. 3) з використанням алгоритму навчання за новими даними ТП.

Критерій ефективності задачі оптимізації подано у вигляді квадратичного відхилення між теплотою, що вноситься та витрачається для  $i$ -ї позиції ОРП:

$$F(T, V) = \left( \begin{matrix} V_i Q_n^p + V_i R_s (1 + X) E_{нов} + V_{i+1} E_{n.z.} (T_{i+1}) - \\ - (V_{i+1} + V_i) E_{n.z.} (T_i) - \alpha S \cdot (T_i - T_z) \end{matrix} \right)^2, \quad (3)$$

де  $V_i$  – витрати палива на поточній позиції;  $Q_n^p$  – найнижча теплотворна здатність робочого

палива;  $R_s$  – стехіометричне співвідношення повітря/паливо;  $X$  – коефіцієнт надлишку повітря на позиції печі;  $E_{нов}$  – ентальпія повітря, що поступає на горіння;  $V_{i+1}$  – об'єм палива, що витрачається на наступній позиції;  $T_{i+1}$  – температура на наступній позиції;  $E_{n.e.}$  – ентальпія продуктів горіння, що утворюється при спалюванні  $1 \text{ м}^3$  палива;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $S$  – площа поверхні нагріву;  $T_z$  – температура матеріалу.

Зазначимо, що критерій (3) є нелінійним відносно температурного поля  $T$ , що пов'язано з нелінійною залежністю  $E(T)$ , тому для його дослідження був використаний метод квадратичного програмування. В результаті розв'язання задачі оптимізації визначено оптимальні температурні криві, які дозволяють отримати максимальну якість виробів при мінімальному використанні енергетичних ресурсів. Графіки температурних кривих: еталонної  $T_{max}$  та оптимальної  $T_{dosl}$  для  $i$ -го набору факторів ТП наведені на рисунку 4.

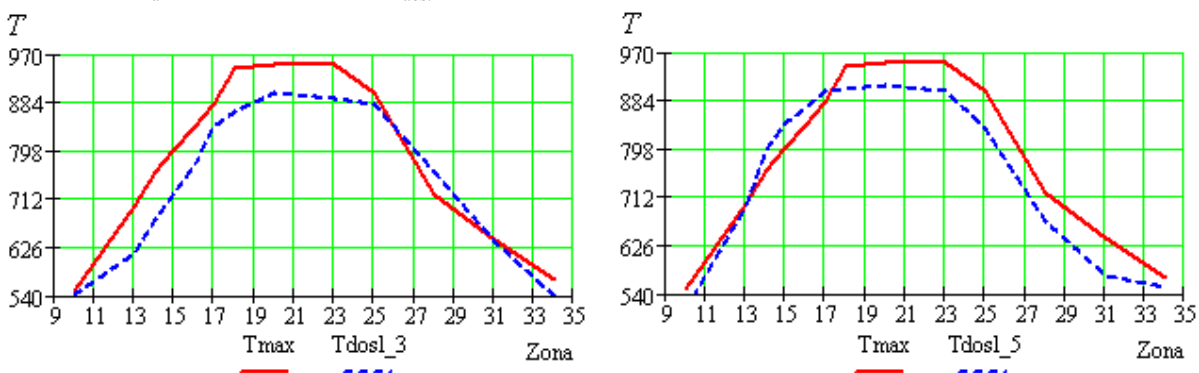


Рис. 4. Температурні криві випалювання

Аналіз витрат палива для підтримання еталонної  $T_{max}$  та оптимальної  $T_{dosl}$  температурної кривої показав, що запропонований метод дозволяє в середньому для однієї партії виробів зекономити  $\approx 428.3 \text{ м}^3$  палива (7,14%).

### Висновок

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 та зменшити енергетичні витрати.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кочетов В. С., Ларченко А. А., Немировский Л. Р. Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов. – Л.: Стройиздат, 1981.– 456с.
2. Москвина С. М., Ковалюк Д. О. Проблемы оптимизации управления технологическим процессом изготовления кирпича // Вестник ХНУ.–2005.–№5.–С.121-125
3. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2003. – 298 с.
4. Ali Y.M., Zhang L. A methodology for fuzzy modeling of engineering systems // Fuzzy Sets and Systems. – 2001. – No. 118. – P. 181-197.
5. Аверкин А. Н., Батыршин И. З., Блишун А. Ф. и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Поспелова Д. А. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
6. Москвина С. М., Ковалюк Д. О. Математическая модель энергосбережения теплового объекта с распределенными параметрами // Вестник Винницкого политехнического института. – 2007. – №4. – С. 15–19.

**Ковалюк Дмитро Олександрович** – к. т. н, старший викладач кафедри комп'ютерних систем управління.

**Москвіна Світлана Михайлівна** – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: moskvina@ukr.net, тел.: (0432)-598222

Вінницький національний технічний університет.