

## КОМП'ЮТЕРНА ПІДТРИМКА ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК681.518

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ДАНИМ

Кулінченко Г.В., Мозок Є.М., Бокоч М.М.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Кулинченко Г.В., Мозок Е.Н., Бокоч Н.М.

## RESEARCH OF INTERPOLATIONS METHODS OF THERMAL FIELD FROM EXPERIMENTAL DATA

Kulinchenko G., Mozok E.M., Bokoch M.

Сумський державний університет,  
Суми, вул. Римського-Корсакова  
[heorhy@vandex.ua](mailto:heorhy@vandex.ua)

*Анотація.* Проведено дослідження методів багатовимірної інтерполяції для відновлення теплового поля по експериментальним даним. Порівняння вихідної та отриманих моделей показує, що метод кригінгу дозволяє отримати порівняно задовільні результати при достатній кількості вихідних значень. Отримані результати показують перспективу подальших досліджень.

*Ключові слова.* Метод зворотно зважених відстаней, метод кригінга, відновлення теплового поля

*Аннотация.* Проведено исследование методов многомерной интерполяции для восстановления теплового поля по экспериментальным данным. Сравнения исходной и полученных моделей показывает, что метод кригинга позволяет получить сравнительно удовлетворительные результаты при достаточном количестве исходных значений. Полученные результаты показывают перспективу дальнейших исследований.

*Ключевые слова.* Метод обратно взвешенных расстояний, метод кригинга, восстановление теплового поля

*Annotation.* A study of multivariate interpolation method for the recovery of the thermal field on experimental data. Comparison of the original and the obtained models showed that kriging method gives relatively satisfactory results with a sufficient number of initial values. The results show the prospect of further research.

*Key words.* The method of Inverse distance weighting, kriging method, reconstitution of the thermal field.

### **Вступ**

Електричний нагрів має широке розповсюдження в різних галузях промисловості. Переваги електронагріву в порівнянні з нагрівом у плам'яних печах полягає у можливості забезпечення більших швидкостей нагріву, високої точності і рівномірності нагріву внаслідок легкості регулювання електричного і температурного режимів [1]. Для коректного управління процесом нагріву в печах, крім завдання степеня за розподілом поля температур самої печі, необхідно враховувати характер зміни температури виробу, що оброблюється [2]. Необхідність в отриманні інформації про поточний розподіл поля термопечі та поля об'єкту накладає відповідні вимоги до процесів обробки даних о ході процесу. Аналіз відомих апаратно-програмних комплексів (АПК) побудови теплових полів показує актуальність досліджень щодо реалізації відображення модельованих полів в реальному масштабі часу.

### **Завдання**

Дослідити методи відновлення нестационарного теплового поля, які б дозволяють будувати поле в режимі реального часу по експериментальним даним.

Необхідність роботи АПК в режимі реального часу накладає вимоги по швидкодії реалізованого методу, тому основний критерій при порівнянні методів – швидкодія. Додатковим критерієм є точність відновлення розподілу температури.

В роботі використані: метод зворотно зважених відстаней (IDW), метод Крігінга, метод кінцевих елементів (МКЕ), математичне моделювання в програмних середовищі Matlab.

### **Аналіз досліджень**

Існуючі розрахункові методи побудови теплових полів із-за притаманних їм недоліків не дозволяють отримувати коректні результати, особливо в умовах обмеженості вихідних даних. Потужні пакети програмного моделювання (Ansys, Comsol) потребують великих розрахункових потужностей та не дозволяють реалізувати поставлену мету. Також при використанні таких продуктів відсутня можливість порівняння змодельованих полів з реальним розподілом температури в об'єкті. Поля будуються на базі теоретичних співвідношень, не враховуючи дані із давачів, встановлених на об'єкті.

Класичні підходи до відновлення температурного поля по вимірним значенням температури вирішують стандартну задачу інтерполяції, яка доповнюється знаходженням апроксимуючого полінома до вузлових температур окремо для кожного елементарного об'єму простору об'єкту [1]. Процедури інтерполяції, що базуються на системі рівнянь для всіх елементарних об'ємів, в результаті реалізації методу найменших квадратів (МНК) [2] передбачають розв'язання системи рівнянь високого порядку. Окрім недоліків, зв'язаних з неузгодженостями температур на дотичних межах елементарних об'ємів моделі, слід вказати на громіздкість реалізації таких методів.

Одним з альтернативних варіантів просторової інтерполяції значень моделі є метод зворотно зважених відстаней (ЗЗВ) -(IDW)[3] та метод Кригінга [4]. Це методи багатовимірної інтерполяції. Метод IDW відносять до детермінованих методів інтерполяції, оскільки він базується на вимірних значеннях, які потрапляють до околиць інтерпольованої точки, із наступним згладжуванням.

Метод Кригінга відносять до іншої групи методів, які засновані на статистичних моделях, які включають аналіз автокореляції (статистичні відношення між вимірними точками). Завдяки використанню варіограм при дослідженні можна не тільки створювати прогнозовані поверхні, а також надавати деякі виміри достовірності або точності прогнозованих значень. При Кригінгу припускається, що відстань або напрямок між опорними точками відображає просторову кореляцію, яка може використовуватись для пояснень змін у просторі. Кригінг аналогічний до ЗЗВ (IDW) у тому, що він зважає навколишні вимірювані значення для того щоб отримати передбачення для не вимірюваної області. Таким чином виміряні значення, які знаходяться ближче до прогнозованої точки, мають більший вплив на неї. Основна формула для цих двох методів інтерполяції формується як зважена сума даних:

$$f(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i f(x_i) \quad (1)$$

де:  $f(x_i)$  – вимірюване значення в місцезнаходженні  $i$ ,  $\lambda_i$  – невідома вага для вимірюваного значення  $i$ ,  $x_0$  – місцезнаходження передбачення,  $N$  – кількість вимірних значень.

В ЗЗВ вага  $\lambda_i$  (2) залежить тільки від відстані до місця інтерполяції:

$$\lambda_i = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (2)$$

де:  $d(x, x_i)$  – відстань між відомою точкою  $x_i$  і невідомою точкою  $x$ ,  $p$  – ваговий параметр.

При використанні методу Кригінга для обчислення коефіцієнтів інтерполяції  $\lambda_i$  використовується положення точок  $x, x_1, x_2, \dots, x_N$  і модель випадкового процесу (варіограма). Коефіцієнти  $\lambda_i$  обчислюються так, щоб математичне очікування результуючої величини  $f(x)$  дорівнювало математичному очікуванню значення випадкового процесу в цій точці, а дисперсія різниці  $f(x) - f(x_i)$  була мінімальною. В якості моделі випадкового процесу використовується функція  $d(a, b)$  - варіограма, що характеризує залежність очікуваної відмінності між значеннями процесу в деяких точках  $a$  і  $b$  від місцезнаходження цих точок. При відомій варіограмі значення вагових коефіцієнтів обраховуються згідно з формулою (3).

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} d(x_1, x) \\ \vdots \\ d(x_n, x) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} d(x_1, x_1) & \cdots & d(x_1, x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ d(x_n, x_1) & \cdots & d(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Гаусова модель варіограми представлена формулою (4).

$$d(a, b) = \alpha + \beta(1 - e^{-\gamma h^2}) \quad (4)$$

$\alpha, \beta, \gamma$  – коефіцієнти масштабу, які обраховуються методом найменших квадратів по точкам варіограми,  $h$  – анізотропія, відносно обраної відстані.

Для отримання початкових даних (сигналів давачів температури) було проведене імітаційне моделювання процесу нагріву печі у математичному пакеті Matlab. Диференційні рівняння, отримані в результаті використання методу кінцевих

елементів (МКЕ), вирішувались за допомогою вбудованого в Matlab інструменту PDEToolbox.

Завдання, поставлене в роботі, вирішувалося на основі порівняння результатів моделювання згаданих методів. На рис. 1. показана візуалізація теплових полів, отриманих різними методами.

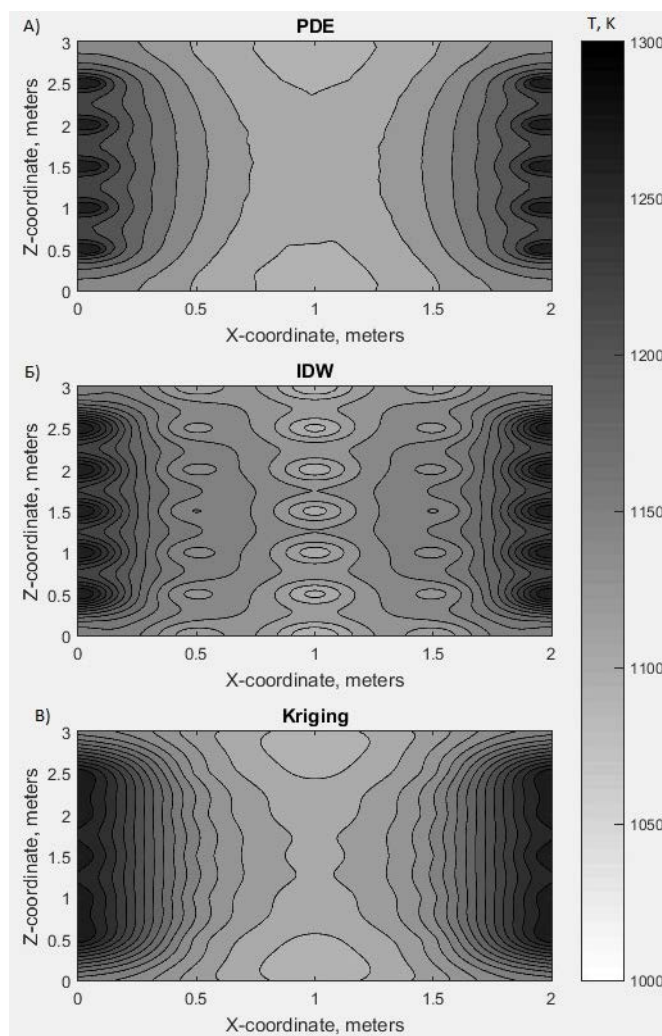


Рис. 1. Результати моделювання  
 А) вихідна модель Б) метод ЗЗВ В) метод Кригінгу

На рис. 1А показано поле, що розраховане в середовищі Matlab на основі експериментальних даних, отриманих від температурних датчиків, розташованих у просторі печі. На рис. 1Б, 1В– поля, що розраховані із тих же даних методами ЗЗВ і Кригінгу відповідно.

Для оцінки похибки моделювання порівнюємо числові результати розрахунку просторової температури по вертикалі(вісь Z, X=1) та горизонталі(вісь X, Z=1.3), які приведені на рис. 2 і табл. 1.

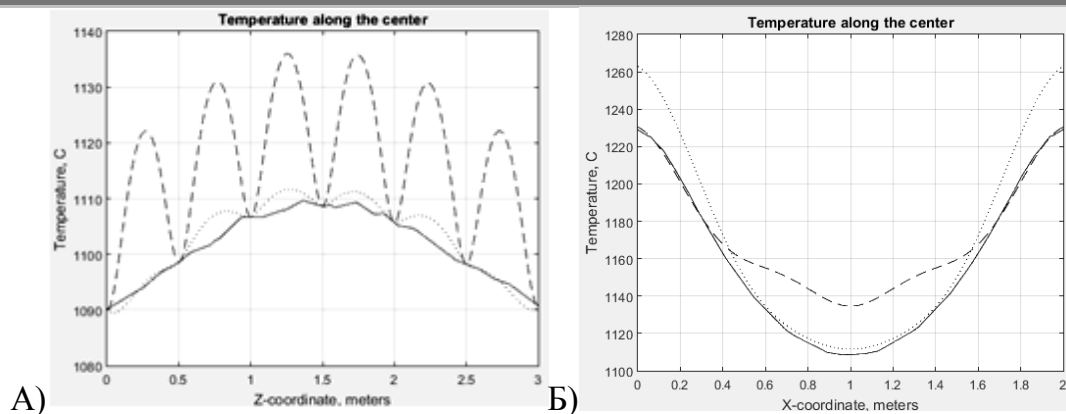


Рис. 2. Порівняння результатів моделювання (суцільна – вихідна модель, штрихована – 3ЗВ, крапчаста - Кригінг)  
 А) температура по висоті печі; Б) температура по горизонталі.

Таблиця 1.

Метод	Час розрахунку	Середньоквадратична похибка всього поля	Середньоквадратична похибка рис. 2А	Середньоквадратична похибка рис. 2Б
МКЕ (вих)	6,96 с	-	-	-
3ЗВ	2,92 с	14,4	18,51	18,15
Кригінг	4,72 с	9,77	15,75	2,11

Із табл. 1 видно, що кожний метод розрахунку поля характеризується своїм часом реалізації моделі. Головний чинник результатів полягає в тому, що модель побудови поля за МКЕ (PDE) малоперспективна для її реалізації в реальному масштабі часу.

Відмінність методів впливає і на середньоквадратичну похибку моделювання. Суттєвим фактором моделювання поля є кількість точок вимірювання температури. При зменшенні кількості точок вимірювання середньоквадратична похибка збільшується на порядок, і обидва методи інтерполяції поля показують порівняні похибки. При семи точках вимірювання: середньоквадратична похибка 3ЗВ – 95,16, Кригінгу – 100,73.

Тому наступним етапом досліджень передбачається обґрунтування необхідної мінімальної кількості вимірюваних точок температури поля, яка забезпечить потрібну точність вимірювань.

### Висновки

Застосування вимірювань реальних температур об'єкту для корегувань розподілу поля, що відображує стан об'єкту, обумовлює розробку нових програмно-апаратних засобів, які дозволять вести керування в реальному часі.

У відповідності із завданням досліджень випробувано відомі алгоритми побудови поля на базі програмного середовища Matlab. Отримані результати дозволяють сформулювати подальші напрямки розробки засобів відновлення функції розподілу теплового поля об'єкту по мінімуму дискретних точок, вимірювання.

Впровадження результатів передбачається в розробці модельної експериментальної установки для керування параметрами теплових процесів.

### Література

1. Скоб Ю.О. Чисельне розв'язання спряженої задачі теплообміну в камерах термообробки / Ю.О. Скоб // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 4. – С. 79-83.
2. Гуляев А.В. Восстановление и точность представления температурного поля при обжиге подины электролизера, проблемы рассматриваемого метода / А.В. Гуляев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 3. – С. 11-15.
3. Кацевич Л. С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей / Л. С. Кацевич. – Москва: Энергия, 1977. – 304 с.
4. Кулинченко Г.В., Мозок Е.Н. Мониторинг состояния теплового объекта.// «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології». Київ.-2014" - НТТУ «КПІ».- 2014.- С. 21-22
5. XinChen, HuiZhen, YueqiHan, ZhaoyangWei, JinongDong, KaichaoWu. Real-Time 3D Visualization of Temperature Distribution for Data Center Thermal Management//3rd International Conference on Multimedia Technology. ICMT 2013.-p.895-902.
6. Кошель С.М., Мусин О.Р. Методы цифрового моделирования: Кригинг и радиальная интерполяция // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2000. - №4(26)-5(27). – с.32-33. – 2001. - №1(28). – с.58, №2(29)-3(30). – с.23-24.

УДК 621.57

## МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖУВАЧА ПОВІТРЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ СЕПАРАЦІЇ ВОЛОГИ

Кулінченко Г. В., Леонтьєв П. В., Лістратенко К. О.

## МОДЕЛЬ ОХОЛАДИТЕЛЯ ВОЗДУХА ДЛЯ УСТАНОВКИ СЕПАРАЦИИ ВЛАГИ

Кулинченко Г. В., Леонтьев П. В., Листратенко Е. А.

## MODEL AIR COOLER FOR THE PLANT OF SEPARATION MOISTURE

Kulinchenko G., Leontiev P., Listratenko K.

Сумський державний університет,  
м. Суми, Україна,  
[heorhy@yandex.ua](mailto:heorhy@yandex.ua)

*Анотація.* Побудована модель керованого охолоджувача, що використовується в експериментальній установці відбору вологи. Використання моделі дозволяє вдосконалювати конструкцію охолоджувача та оптимізувати режими його роботи.

*Ключові слова:* експериментальна установка відбору вологи, теплообмінник, холодоагент, конденсація вологи, математична модель