

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт
з галузей знань і спеціальностей у 2018/2019 навчальному році
Галузь знань (спеціальності): «Енергетичне машинобудування»

**ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ
ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПРИ ТЕПЛОВИХ ВИПРОБУВАННЯХ
КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК**

Шифр «Передбачення»

2019 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Умови проведення теплофізичних експериментів в топці парового котла на ТЕ.....	7
2. Принципова теплова та розрахункова схема теплофізичного експерименту.....	9
2.1 Математична модель теплопереносу в досліджуваному матеріалі.....	10
2.2 Розрахункова модель теплофізичного експерименту.....	13
3. Параметрична ідентифікація теплопровідності вогнетривких матеріалів. Похибки оцінок теплопровідності. Метод планування теплофізичного експерименту	16
3.1 Параметрична ідентифікація теплопровідності - як рішення ЗЗТ.....	16
3.2 Похибки оцінок теплопровідності (рішення ЗЗТ).....	16
3.2.1 Коваріаційна матриця помилок оцінок ТФХ.....	17
3.3 Метод планування теплофізичного експерименту в топці КУ.....	22
4 Результати планування експерименту для оцінки теплопровідності вогнетривкого матеріалу в топці КУ.....	24
4.1 Результати планування деяких факторів експерименту	24
Висновки.....	28
Перелік джерел посилань.....	29

ВСТУП

Основою теплоенергетики України є теплові електричні станції (ТЕС), які працюють на органічному паливі. Всього на ТЕС України встановлено 104 енергоблоки потужністю від 150 до 800 МВт загальною потужністю 28,7 млн. кВт (не всі з них на сьогодні знаходяться в експлуатації) [1]. У свою чергу, переважна більшість всіх енергетичних котельних установок (КУ) на ТЕС знаходиться в експлуатації 40 і більше років. Очевидно, що такий термін експлуатації, який істотно перевищує нормативні вимоги, призводить до того, що КУ виробили технічний ресурс і морально застаріли. Наслідки такого стану технічного парку створюють проблеми з технічною та економічною ефективністю роботи ТЕС, забезпеченням безпеки, захистом навколишнього середовища, вирішенням соціальних проблем місцевого населення. Зокрема, вироблення ресурсу призводить до частого виходу з ладу елементів КУ, особливо тих, які знаходяться у важких умовах роботи.

Для топок КУ таким елементом є обмурування поверхонь теплообміну (теплових екранів), призначене для їх огороження та ізоляції від гарячих димових газів і забезпечує непроникність топки для зовнішнього повітря. У найбільш важких умовах працюють матеріали обмурування, що піддаються впливу високотемпературних газів, шлаку і золи, а також механічного впливу з боку потоку газів, робочого тіла в трубопроводах і допоміжного обладнання.

Таким чином, з-за прогресуючих у часі процесів руйнування при експлуатації КУ, в огорожах їх топок накопичуються нещільності, за рахунок яких газопроникність огорож істотно зростає, що призводить до порушення режиму горіння в топці та зростанню теплових втрат КУ [2,3].

Таким чином можна стверджувати, що всі перераховані фактори, які впливають на характеристики обмурівки з вогнетривів в КУ, призводять, зрештою, до зміни – збільшення, як показує практика, її теплопровідності і, відповідно, до погіршення теплозахисних та ізолюючих властивостей. Тому

теплопровідність матеріалів обмурування, чисельно визначається величиною коефіцієнта теплопровідності, Вт/м К, є визначальною експлуатаційною характеристикою цих матеріалів. Тут необхідно відзначити, що під теплопровідністю обмурування топки КУ слід розуміти сумарну ефективну теплопровідність конструкції огорож з плит з вогнетривів, що утворилися в них тріщин і ерозій, оплавлених ділянок, швів і нещільностей в конструкції.

В кінцевому підсумку, оцінка теплопровідності обмурування топки в процесі експлуатації КУ стає значущим завданням, від задовільного вирішення якого залежать декілька відсотків ККД бруто котла.

Також слід зазначити, що спроби теоретичного розрахунку теплопровідності речовин і матеріалів практично не дали позитивних результатів, тільки для деяких (переважно металів) хімічно чистих речовин, отримані задовільні результати в вузьких температурних діапазонах [4].

Потреби сучасної науки і техніки зумовили розробку і використання великої кількості методів визначення теплопровідності, і всі без виключення з них використовують експериментально отримані характеристики процесів теплообміну в досліджуваних речовинах і матеріалах.

У цьому плані особливий інтерес для нас представляють методи визначення теплопровідності, засновані на результатах натурних експериментів, для яких не потрібні спеціальні експериментальні установки і зразки досліджуваних матеріалів. Ці методи найбільш відповідають ситуації з дослідженням обмурування КУ.

Подібний підхід реалізований в методах оцінки параметрів теплопереносу реальних складних об'єктів – методах зворотних задач теплопровідності (ЗЗТ). ЗЗТ вирішуються експериментально-розрахунковими методами з використанням інформації датчиків про тепловий стан досліджуваної системи (t , q , G , τ і т. д.) [5,6].

При цьому особливістю ЗЗТ є можливість оцінки нелінійних та нестационарних параметрів тепло переносу $\lambda(t)$, $q(t)$, $\alpha(t)$, $q(\tau)$ і т. д. При

цьому для ЗЗТ не обмежують рівень t , величину q , швидкість перехідного процесу, значення теплофізичних характеристик середовища, де проходить досліджуваний процес. ЗЗТ використовує моделі, адекватні реальній картині теплопереносу, тобто модель може бути багатовимірною, нелінійною, неоднорідною і нестационарною. Це означає, що для вирішення ЗЗТ не треба обмежувати реальний експеримент умовами забезпечення лінійності ($\min \Delta T$), рівня температур ($\min T$), рівномірності ($q(x) = \text{const}$), нестационарності ($q(\tau) = \text{const}$), одномірності $q(x, y) = q(x)$, і т. д.. При цьому залежність оцінюваних величин від змінних стану може описуватися різними закономірностями, що задаються, виходячи з попередніх даних. Тому методивирішення ЗЗТ оптимальні при дослідженні теплових систем в режимі реального часу. Це особливо важливо для нашого випадку, так як спеціально проводити експериментальні випробування КУ дорого і не завжди можливо.

У ЗЗТ температурна залежність вогнетривких матеріалів визначається за результатами вимірювання температур або теплових потоків в досліджуваних зразках на основі математичних моделей теплопереносу в них. Залежність $\lambda(t)$ при цьому апроксимується узагальненими поліномами від t з постійними (не залежать від t) коефіцієнтами λ_j , поєднуваними в вектор параметрів $\bar{\lambda} = [\lambda_j]_{j=1}^r$. Така апроксимація дає можливість представити задачу вимірювання (оцінки) як задачу параметричної ідентифікації $\bar{\lambda}$ [5].

Для ЗЗТ досить глибоко досліджені питання достовірності і точності одержуваних результатів при наявності у вихідній експериментальній інформації істотних шумів (похибок), тобто отримані рішення метрологічно забезпечені [7]. Представлення результатів ідентифікації параметрів як оцінок випадкових величин тут виконується в силу випадковості вихідних результатів вимірювань температур або теплових потоків. Постановка задачі оцінки залежності $\lambda(t)$ як ЗЗТ дає можливість апріорно статистично оцінити

величини відхилень отриманих оцінок від істинних значень. Така постановка завдання дозволяє віднести її до завдань планування експерименту.

Похибки отриманих оцінок $\delta\lambda_j$ характеризуються спільною довірчою областю, що представляє r -мірний еліпсоїд, який з ймовірністю $1 - \alpha$ містить похибки отриманого вектора $\hat{\lambda}$, де α - задана довірна ймовірність.

Для нашого випадку все це має дуже важливе значення, так як підготовка та метрологічне забезпечення теплофізичного експерименту на КУ вимагає великих організаційних і матеріальних витрат. Такий експеримент в будь-якому випадку буде характеризуватися високим рівнем максимальних температур (1150...1300 °С) і теплових потоків ($q(t) = 0.5 \cdot 10^4 \dots 0.5 \cdot 10^5$ Вт/м² К), високим рівнем шумів (електромагнітних наводок) від працюючого потужного обладнання ТЕС, труднощами або практичною неможливістю технологічного доступу до обмурівці в умовах КУ.

У нашому випадку основний інтерес представляє вибір оптимальної кількості датчиків температури і місць їх установки всередині досліджуваного вогнетривкого матеріалу, чому і присвячено подальше дослідження.

1. УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ В ТОПЦІ ПАРОВОГО КОТЛА НА ТЕС

Сучасні КУ характеризуються високим рівнем температур і теплових напруг топкового простору, що створює важкі умови для роботи обмурівки стінок і поверхонь теплообміну топки. Основними проблемами експлуатації обмурівки енергетичних котлів є продовження терміну служби, ефективна ізоляція топкового обсягу і скорочення теплових втрат через обмурування. Ці втрати становлять, наприклад, 0,85% тепла спалюваного палива для котла з паропродуктивністю $D=230$ т/год (ТП 230).

В процесі експлуатації обмурування топки омивається високотемпературними газами (від 1400 до 1200 °С), а також піддається хімічному впливу шлаку і золи. Також обмурування піддається руйнівній дії систем змиву шлакових відкладень з теплових екранів та вібраційному впливу з боку потоку димових газів, трубопроводів робочого тіла і допоміжного обладнання. У міру експлуатації газопроникність обмурування зростає, причому газопроникність нормальної кладки визначається в 75 % її швами і 25 % - проходом газів через цеглу [2]. При роботі КУ під розрідженням все це збільшує коефіцієнт надлишку повітря в топці, що призводить до порушення режиму горіння в топці та зростанню теплових втрат КУ - зменшенню ККД бруто котла. [3]. Причому цей процес відбувається переважно в нижній радіаційній частині топки, там, де формується факел і відбувається основна частина горіння палива.

Як було показано вище, однією з основних теплових і експлуатаційних характеристик матеріалів обмурівки є їх теплопровідність, яка чисельно визначається величиною коефіцієнта теплопровідності $\lambda(t)$, Вт/м К.

Для вогнетривких матеріалів, використовуваних для обмурування, величини і характер зміни $\lambda(t)$ суттєво залежать від температури, технології виготовлення, пористості і т. д., і досить добре вивчені (зведені в довідкові дані). Теплопровідність цих матеріалів є складною функцією їх складу,

технології виготовлення і умов експлуатації. Так, з ростом пористості матеріалу $\lambda(t)$ зменшується. З іншого боку, при шлакуванні поверхні обмурівки і спікання вогнетривких блоків в склоподібну масу, пористість обмурівки знижується ($\lambda(t)$ зростає). Також, при тривалій експлуатації котла, пористість (газопроникність) обмурівки зростає з-за утворення тріщино внаслідок нерівномірного прогрівання стінок топки, охолодження струменем води при змиві шлаку, а також з-за вібрації цих стінок (в результаті $\lambda(t)$ зменшується). Таким чином, $\lambda(t)$ обмурівки котла змінюється в часі під впливом неоднозначних факторів, але на практиці сумарний ефект таких змін призводить до збільшення теплових втрат топки і погіршенню горіння палива.

Тут необхідно відзначити, що під теплопровідністю обмуровування топки КУ слід розуміти сумарну ефективну теплопровідність конструкції огорож з плит з вогнетривів, що утворилися в них тріщин і ерозій, оплавлених ділянок, швів і нещільностей в конструкції.

З цього випливає висновок про некоректність оцінки $\lambda(t)$ на підставі дослідження зразка матеріалу, вирізаного з цієї огорожі з-за невідтворюваності у зразку середньої за обсягом структури та умов теплообміну поза огорожі. Адже властивості окремого зразку вогнетривкого матеріалу не будуть обов'язково тотожні властивостям того ж матеріалу, який є частиною обмурівки і має передісторію експлуатації в топці КУ.

2. ПРИНЦИПОВА ТЕПЛОВА ТА РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ТЕПЛОФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Істотні можливості для оцінки теплопровідності теплоізоляційних матеріалів надають методи ЗЗТ. Для цих методів характерні [5, 6, 7]:

- 1) істотно менші вимоги до умов (режимів) отримання експериментальних даних;
- 2) використання натурних експериментів (без спеціальних установок або стендів);
- 3) отримання оцінок вимірюваних величин зі статистично достовірними похибками;
- 4) можливість планування самого експерименту.

У переважній більшості досліджень з використанням методів ЗЗТ приймають нестационарний тепловий режим нагріву (охолодження) зразка досліджуваного матеріалу з реєстрацією граничних умов (ГУ) і температур в декількох внутрішніх точках зразка (рис.1). При цьому зазвичай вимірюються ГУ I роду (температури), так як точне вимірювання нестационарних ГУ II роду (теплових потоків) є досить складною самостійною ЗЗТ [5, 6].

Схема експерименту передбачає дослідження матеріалів футеровки топки котла в процесі його експлуатації на перехідних режимах (включення, зупинка, зміна режиму). Для цього датчики температури встановлюються по товщині футеровки в топці. У реальній КУ вимірюється хід температур за допомогою встановлених по одній осі (перпендикулярно стінці топки) термопар з відомими координатами. Таким чином, в огороженні топки виділяється зона, відповідна зразку досліджуваного матеріалу. Експеримент організується таким чином, щоб створюване в зразку температурне поле було одновимірним уздовж осі (що дозволяє використовувати більш просту

математичну модель теплопереносу), як показано на рис. 2.1. Для цього область установки датчика повинна мати ізотермічний ділянку (уздовж поверхні, перпендикулярно напрямку установки термодпар). Практично така область завжди може бути виділена на поверхні топки. Її розміри (радіус) повинні бути на порядок більше, ніж довжина ділянки, що відповідає, приблизно, 1м.

Нагрівання зразку проводиться з торцюз боку топки з вимірюванням осьового розподілу температур. Тепло від іншого торця виділеної ділянки відводиться в навколишнє середовище за рахунок теплопровідності через шар футеровки до зовнішньої стінки топки.

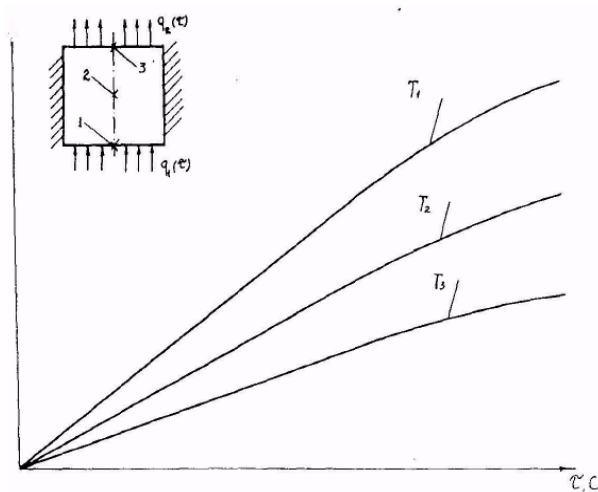


Рис.2.1-Теплова схема експерименту по нагріванню і термометруванню зразка досліджуваного матеріалу

2.1 Математична модель теплопереносу в досліджуваному матеріалі

Теплоперенос в твердому тілі для нестационарного і нелінійного щодо теплофізичних характеристик (ТФХ матеріалу, описується рівнянням Фур'є. Математична модель для цього випадку має такий вигляд:

$$c_v(T) \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{з початковими умовами: } T(x, \tau_0) = T_0, \quad (2.2)$$

$$\text{з граничними умовами 1 роду: } -T_n = f(x, \tau), \quad (2.3)$$

де індекс n позначає кордон (поверхня) зразка, а $C_v(T)$ - теплоємність матеріалу обмуровки, Дж/ кг К.

Співвідношення (2.1) - (2.3) задають крайові умови або умови однозначності. Ці умови однозначно пов'язують величини температур з величинами теплопровідності і теплоємності. Цей взаємозв'язок дає можливість, знаючи $C_v(t)$ і величини експериментально вимірених температур оцінити величину $\lambda(t)$.

Значення теплоємності $C_v(t)$ і густини ρ досліджуваних матеріалів визначаються, виходячи з даних хімічного складу матеріалів, їх пористості. При цьому робиться припущення, що теплоємність підпорядковується правилом адитивності [8].

З довідкових даних [9] випливає, що теплопровідність значного числа вогнетривких матеріалів істотно залежить від температури. У більшості відомих методів необхідною умовою рішень ЗЗТ є параметризація завдання або подання залежності ТФХ від температури, зокрема - $\lambda(t)$ та $C_v(t)$ за допомогою набору постійних параметрів - коефіцієнтів апроксимацій зазначених температурних залежностей. Цю залежність можна висловити у вигляді $\lambda(T) = f(\bar{\lambda}, T)_r$, де f -нелінійна в загальному випадку функція $\bar{\lambda} = \left[\lambda_j \right]_{j=1}^r$, де λ_j - коефіцієнт апроксимації. Відомі різні апроксимації шуканих ТФХ, наприклад: кусочно-постійна, поліноміальна, ряди за ступенями сплайн-апроксимація. Спираючись на роботи [5, 6, 7] в роботі використовувалася апроксимація ТФХ В-сплайнами I порядку.

Аналіз довідкових даних [9] для керамічних конструкційних матеріалів в розглянутому діапазоні температур показав, що залежність ТФХ для більшості матеріалів характеризується монотонністю, відсутністю екстремумів, стрибків та інших особливих точок. У зв'язку з цим порядок

сплайнів, необхідний для задовільної апроксимації може бути невисоким. Це пов'язано з тим, що збільшення числа параметрів значно (пропорційно r^2) збільшує обсяг обчислень і вимагає більшої кількості експериментальної інформації; а також підвищення порядку апроксимуючих сплайнів, що може призвести до нестійкості рішення ЗЗТ.

У зв'язку з вищевикладеним, нами використана така апроксимація В-сплайнами 1-го порядку:

$$\lambda(T) = \lambda_{j=1}^r \text{Sp}^1(T) \quad (2.4)$$

$$\text{Sp}^1(T) = \begin{cases} 1 - |\xi| \text{ при } |\xi| < 1, \\ 0 \text{ при } |\xi| > 1 \end{cases}$$

де - λ_j коефіцієнти сплайн-апроксимації; $j = T/h - j + 1$ - безрозмірний аргумент сплайн-функції; h - ділянка апроксимації, величина якого вибирається з фізичних міркувань. В розглянутій апроксимації λ_j рівні значенням у вузлах апроксимації з номерами j .

Дані досліджень показали, що при використанні 4-х ділянок апроксимації В-сплайнами I порядку ($r=5$), зазначена середньоквадратична похибка апроксимації складає менше 1%. У зв'язку з цим надалі будуть використовуватися чотири ділянки апроксимації з числом $r=5$ коефіцієнтів сплайн-апроксимації. Зазначений вибір не є принципово єдиним і при необхідності може бути обрано більше число ділянок апроксимацій.

В якості вогнетривкого матеріалу для футеровки поверхні топки котла нами обраний високопористий плавлений мулітокорундовий вогнетрив з вмістом Al_2O_3 до 90% [9, Табл.12]. Апроксимовані В-сплайнами I порядку в зазначеному інтервалі температур теплопровідність і теплоємність цього вогнетриву наведені на рис.2 (а, б).

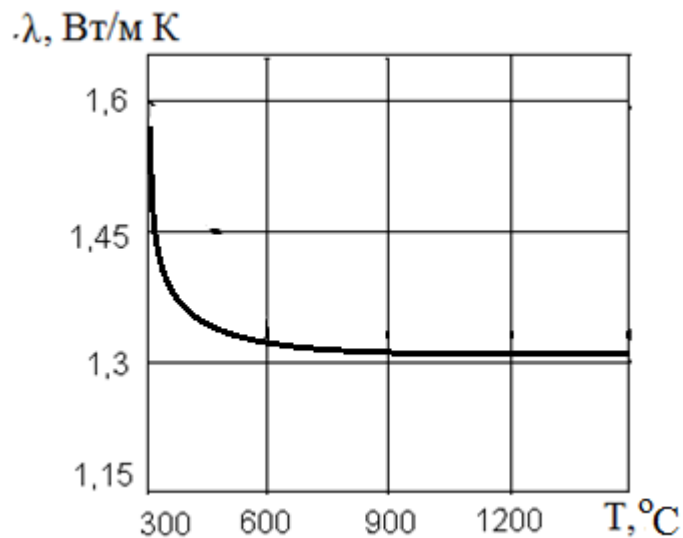


Рис. 2 (а) – Теплопровідність досліджуваного вогнетриву

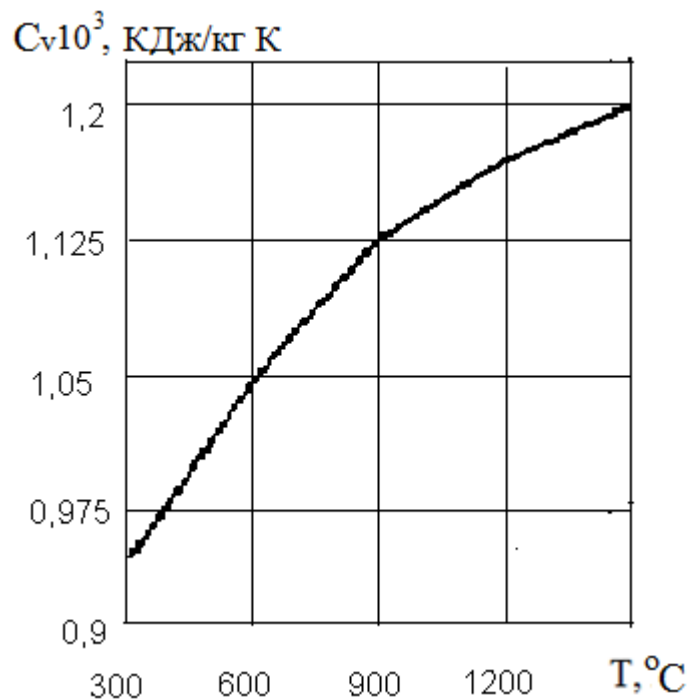


Рис. 2 (б) - Теплоємність досліджуваного вогнетриву .

2.2 Розрахункова модель теплофізичного експерименту

Особливістю відомих методів рішення ЗЗТ крім вимог високої точності є багаторазовість звернень до вирішення рівняння тепло переносу в зразку досліджуваного матеріалу.

Нелінійні рівняння типу (2.1) допускають аналітичні рішення тільки у виняткових випадках і в силу цього інтегруються чисельно. Універсальним

чисельним методом, що дозволяє інтегрувати зазначені рівняння, є метод кінцевих різниць. При цьому безперервна область зміни аргументів X, T замінюється сіткою - кінцевим (дискретним) безліччям точок (вузлів). Рівняння (2.1) замінюється на сітці схемою кінцевих різниць або рівнянням в кінцевих різницях. Існує кілька типів схеми кінцевих різниць, з яких ми використовували неявні схеми, які є абсолютно стійкими: - обчислювальні помилки в таких схемах не зростають при будь-яких співвідношеннях X і τ [10].

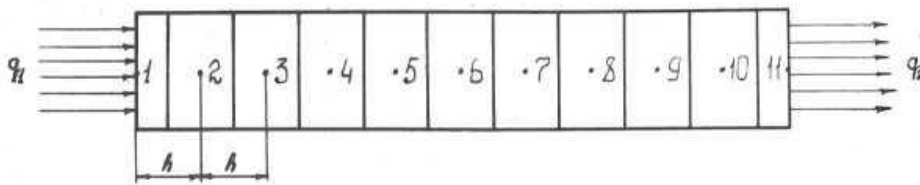


Рис. 2.2 - Схема розбиття зразка досліджуваного матеріалу на блоки при чисельному розрахунку його температурного поля

Характеристики схеми експерименту, необхідні для розрахунку теплового поля в зразку досліджуваного матеріалу, приймаємо для випадку включення котла з холодного стану. Довжина зразка $l = 18 \cdot 10^{-2}$ м. (відповідає товщині шару футеровки). В якості початкових умов приймемо рівномірний розподіл температур за зразком $T(\tau=0) = 300$ К. Моделюються варіанти нагріву з граничними умовами II роду, в яких досліджувані зразки нагріваються до 1500 К за 720 с, а граничні умови II роду задаються у вигляді: $q_1 = q_1(\tau)$, $q_2(\tau) = 0$, де $q_1 = 0,45 \cdot 10^4$ Вт/м².

Шляхом рішення рівняння (2,1) розрахована зміна температур за часом в трьох блоках зразку – температури першого та останнього блоків, використовувані в подальшому як вимірювані граничні умови I роду, і температура T_{3k} центру блока №3, яка надалі буде використовуватися як модель результату вимірювання. Для цього кожне з отриманих значень температури T_{3k} блоку буде підсумовуватися з шумом вимірювань - $u_k = T_{3k} + \epsilon_k$. В якості шуму ϵ_k вимірювань використані нормально розподілені,

випадкові величини з нульовим математичним очікуванням і дисперсією σ^2 . Величини розраховувалися за програмами стандартного математичного забезпечення ПЕОМ.

Розраховані таким чином температури $T_{1К}$, $T_{2К}$ і $T_{3К}$ показані на рис. 2.3, де $T_{1К}(1)$ і $T_{3К}(3)$ – граничні умови першого роду, $T_{2К}(2)$ – температура, що вимірюється.

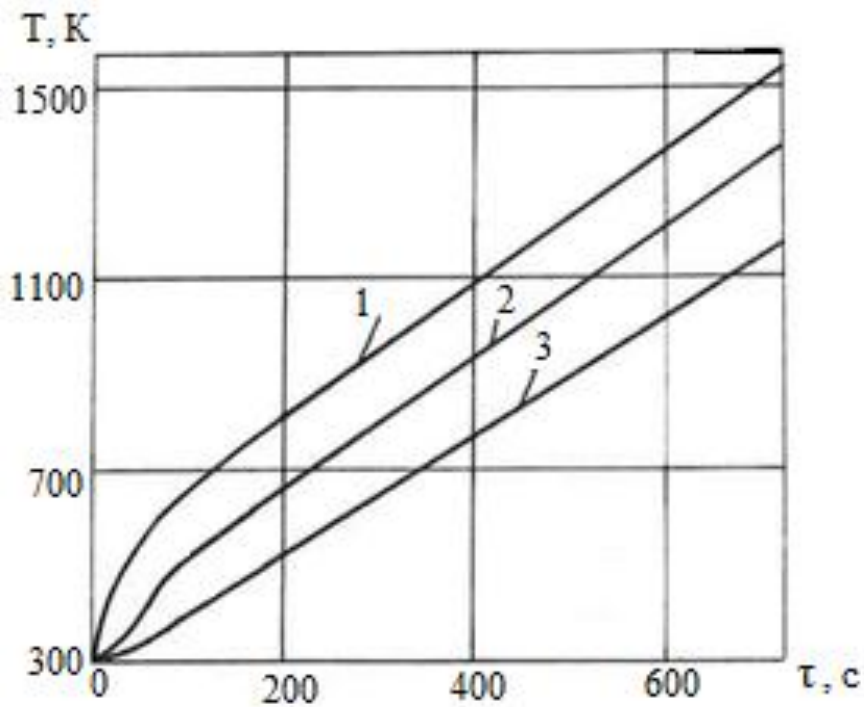


Рис. 2.3 - Зміна температур зразка досліджуваного вогнетриву при нагріванні.

Число вимірювань $N=120$, максимальна температура нагріву $T_{3К} = 1200$ °С, час нагріву $\tau = 720$ с. Дисперсія шуму вимірювань $\sigma^2 = 1$ К².

3. ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГNETРИВКИХ МАТЕРІАЛІВ. ПОХИБКИ ОЦІНОК ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ. МЕТОД ПЛАНУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Параметрична ідентифікація теплопровідності - як рішення ЗЗТ

Як зазначалося вище, задачу параметричної ідентифікації теплопровідності $\bar{\lambda}(T)$ вогнетривких матеріалів в топці КУ слід вирішувати як зворотну задачу теплопровідності. ЗЗТ вирішують мінімізацією квадратичного функціоналу нев'язки, утвореного вектором \bar{Y}_k вимірних експериментально температур, і вектором $\bar{T}_k(\hat{\lambda})$ - температур, розрахованих за моделлю теплопереносу. Тут $\bar{Y}_k = [y_{ik}]_{i=1}^m$ - вектор температур $y_{ik} = t_{ik} + \varepsilon_{ik}$, вимірних в m - точках зразка з похибками прямих вимірювань ε_{ik} ; $\bar{T}_k(\hat{\lambda}) = [t_{ik}(\hat{\lambda})]_{i=1}^m$; - вектор температур $t_{ik}(\hat{\lambda})$, розрахованих в тих же m - точках по моделі теплопереносу в зразку; $\hat{\lambda}$ - результат ідентифікації; $k=1, 1, \dots, N$ - дискретні моменти часу (в які проводилися вимірювання).

Вектор температур $t_{ik}(\hat{\lambda})$ розраховується виходячи з моделі (4.1) нестационарного теплопереносу в твердому тілі.

3.2 Похибки оцінок теплопровідності (рішення ЗЗТ)

Оцінка похибок визначення ТФХ методами ЗЗТ є складною задачею, яка належить до найменш вивченої в теорії вимірювань нагоди сукупних спільних непрямих вимірювань, в який рівняння вимірювань описується диференціальним рівнянням в частинних похідних [11].

Джерелами помилок в ЗЗТ є такі чинники [12]:

- 1) Невідповідність фізичної реальності і математичної моделі явища теплопереносу. У нашому випадку досвід величезного числа досліджень підтверджує адекватність в широкому діапазоні умов рівняння Фур'є теплопереносу в твердому тілі.
- 2) Спрощення в розрахункових методах-лінеаризації, згладжування, апроксимації, відкидання членів ряду і т. д.
- 3) Помилки інструментального походження: у вимірах температури в координатах точок її вимірювання, із-за обмеженого числа вимірювань. Ці помилки можуть мати вигляд як систематичних, так і випадкових. В останньому випадку, в припущенні нормального закону розподілу і нульового математичного очікування, вони характеризуються дисперсією σ^2 .

Аналіз сутності задачі та її відображення в технічній літературі призводить до необхідності розгляду двох типів похибок:

- 1) Похибки першого типу, пов'язаної з тим, що оцінка ТФХ відноситься до некоректно поставлених ЗЗТ, яким властива нестійкість рішень, коли малим відхиленням у вихідних вимірах температури можуть відповідати великі відхилення в шуканих ТФХ [12].
- 2) Похибки другого типу, що викликаються перерахованими вище систематичними помилками. Ці похибки можуть бути зведені до мінімуму при більш ретельній підготовці експерименту, або враховані з допомогою поправок.

3.2.1 Коваріаційна матриця помилок оцінок ТФХ

Для отримання повної статистичної характеристики випадкової складової похибки оцінки ТФХ для помилок першого типу необхідно значну

кількість можливих реалізацій випадкового розподілу вхідних даних, що при великій розмірності вектору шуканих параметрів в задачах параметричної ідентифікації може зажадати неприпустимо великого об'єму як експериментальних даних, так і обчислень.

Виходячи з цих міркувань в роботах [5,13] був запропонований метод оцінки помилок параметричної ідентифікації тепловимірювальних систем, заснований на аналізі форми функції нев'язки (5.1) у просторі шуканих параметрів $\bar{\lambda}$:

$$\Phi(\bar{\lambda}) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N \left[y_{ik} - \bar{T}_k(\hat{\lambda}) \right]^T G \left[y_{ik} - \bar{T}_k(\hat{\lambda}) \right], \quad (3.1)$$

де G – $m \times m$ - матриця ваг вимірювань, індекс T вказує, що матриця транспонірована.

Ця функція утворена вектором \bar{Y}_k експериментально виміряних температур, і вектором $\bar{T}_k(\hat{\lambda})$ - температур $y_{ik} = t_{ik} + \varepsilon_{ik}$, розрахованих згідно моделі теплопереносу (2.1). Тут - $\bar{Y}_k = [y_{ik}]_{i=1}^m$ вектор температур, виміряних в m - точках зразка з похибками прямих вимірювань ε_{ik} ; $\bar{T}_k(\hat{\lambda}) = [t_{ik}(\hat{\lambda})]_{i=1}^m$ - вектор температур $t_{ik}(\hat{\lambda})$, розрахованих в тих же m - точках по моделі теплопереносу в зразку; $\hat{\lambda}$ - результат ідентифікації; $k=1, \dots, N$. Закон розподілу похибок ε_{ik} прямих вимірювань відповідає нормальному.

У цих роботах показано, що коваріаційна матриця

$$P(\hat{\lambda}) = \sigma_T^2 A^{-1} \quad (3.2)$$

для випадку використання алгоритму методу найменших квадратів характеризує дисперсію і взаємну кореляцію оцінок $\hat{\lambda}$.

Матриця Грама A записується наступним чином:

$$A = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N U_{1ik}^2 & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N U_{rik} U_{1ik} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N U_{1ik} U_{rik} & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N U_{rik}^2 \end{vmatrix} \dots\dots\dots(3.3)$$

де $U_{ijk} = \frac{\partial T_{ik}}{\partial \lambda_j}$ – функція чутливості і-ої складової розрахункової

величини вектора стану до j-ому параметру в k-й момент часу. Через нелінійність рівняння (2.1) функції чутливості розраховуються чисельно за формулою:

$$U_{ijk} = \frac{T_{ik}(\lambda_j + \Delta\lambda_j) - T_{ik}(\lambda_j)}{\Delta\lambda_j} \dots\dots\dots(3.4)$$

У формулі A – матриця Грама розглянутої тепло вимірювальної системи, складена з комбінацій функцій чутливості розрахованого згідно моделі теплопереносу в зразку вектору вимірювань в системі до зміни шуканих параметрів $\hat{\lambda}$. Діагональні елементи матриці являють собою дисперсії, а інші елементи характеризують кореляцію оцінок $\hat{\lambda}$.

Величина $\hat{\lambda}$ істотно залежить від ступеня обумовленості матриці A.

Згідно [5] необхідна умова здатності до ідентифікації (єдність розв'язку ЗЗТ) визначається з умови існування матриці, зворотної матриці Грама A^{-1} , яке має вигляд $\det A \neq 0$. Дуже часто матриця A має зворотну, але є погано обумовленою. В [14] показано, що при заданому рівні помилки вимірювань σ^2 точність одержуваних оцінок істотно залежить від степені обумовленості ϵ_v матриці A. Цю степінь обумовленості можна оцінити таким ставленням – найбільшого (v_{\max}) найменшого (v_{\min}) власних значень матриці A:

$$v = v_{\max} / v_{\min} \dots\dots\dots(3.5)$$

Так як сьогодні відсутні аналітичні методи вивчення особливостей функцій багатьох змінних довільної форми, пряме вивчення форми (3.1) при розмірності вектору шуканих параметрів більше 3-х дуже ускладнене. У зв'язку з цим дослідження похибок результатів ідентифікації $\bar{\lambda}$ виконуватимемо шляхом отримання та аналізу коваріаційних матриць (3.2) помилок і спільних довірчих областей оцінок шуканих параметрів.

Припущенням, що лежить в основі можливості отримання коваріаційної матриці помилок оцінок параметрів є можливість лінеаризації моделі (2.1) розрахунку температури (значень вимірювань) поблизу вектору справжніх значень параметрів $\bar{\lambda}_0$. Справжні значення параметрів $\bar{\lambda}_0$ це значення, що ми отримали з довідкової літератури щодо нашого вогнетривкого матеріалу. Ці значення найбільш відповідають можливим властивостям матеріалу і потрібні для розрахунку моделі вектору вимірювань

Також робляться припущення, що всі канали вимірювань температури мають однаковий пристрій і метрологічні характеристики-нульове математичне очікування випадкових похибок вимірювань і однакову коваріаційну матрицю (дисперсію) цих вимірювань.

Похибки отриманих оцінок характеризуються спільної довірчої областю, що представляє r -мірний еліпсоїд, з ймовірністю $1-\alpha$ - містить похибки $\delta\lambda_j$ отриманих $\hat{\lambda}$. Ця область описується наступним виразом:

$$\delta\hat{\lambda}^T H^T G H \delta\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^m W_i \sigma_i^2 \chi^2(r),$$

де H – матриця функцій чутливості до зміни, G – вагова матриця; $\chi^2(r)$ - квантиль χ^2 розподілу; σ_i^2 - дисперсія похибок вимірювань температур; α - задана довірна ймовірність. При цьому передбачається: $\lambda(t)$ - лінійна поблизу справжніх значень $\bar{\lambda}_0$, не корельовані і розподілені за нормальним

законом з відомою σ_i^2 . Для спрощення аналізу еліпсоїд замінюється r – мірним паралелепіпедом, описаним навколо нього, причому грані паралелепіпеда перпендикулярні відповідним осям λ_j , а сторони рівні шуканим апіорним погрішностям $\Delta \hat{\lambda}_j$:

$$\Delta \lambda_j = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m G_i \sigma_i^2 \chi^2(r)}{\bar{F}_j^T H^T G H \bar{F}_j}} \quad (3.6)$$

де - \bar{F}_j робочий вектор, складений з елементів матриці $H^T G H$.

Елементи матриці H розраховуються за виразом (3.4). Для моментів часу k шляхом вирішення рівняння (2.1) можуть бути визначені температури \bar{T}_k , що відповідають складовим вектору вимірювання $\bar{Y}_k: \bar{Y}_k = \bar{\Psi}(\bar{T}(\tau_0), \bar{\lambda}, \tau_k)$.

Сама матриця H складається наступним чином:

$$H_{l+1} = \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{\lambda}} \Bigg|_{\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_1}{\partial \lambda_1} & \dots & \frac{\partial \Psi_1}{\partial \lambda_r} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \frac{\partial \Psi_m}{\partial \lambda_1} & \dots & \frac{\partial \Psi_m}{\partial \lambda_r} \end{bmatrix}$$

Спосіб є наближеним, тому що забезпечує або завищені значення $\Delta \hat{\lambda}_j$ при заданій α , або завищені значення α при заданих $\Delta \hat{\lambda}_j$.

3.3 Метод планування теплофізичного експерименту в топці КУ

Згідно [5,13] одним з конструктивних підходів до планування складних теплофізичних експериментів є управління формою $\Phi(\bar{\lambda})$ згідно з (3.1) в процесі планування і проведення експерименту. Можливість такого управління заснована на тому, що $\Phi(\bar{\lambda})$ залежить як від характеристик теплопереносу в досліджуваному зразку і кількості r шуканих коефіцієнтів апроксимації, так і від усіх зовнішніх факторів, складаючих технологію експерименту. Вибір та оптимізація зазначених факторів кваліфікується, як оптимальне планування експерименту при параметричній ідентифікації виходячи з мінімізації функціоналу (3.1). Згідно [5], такий вибір можна здійснити шляхом апріорного кількісного аналізу коваріаційної матриці помилок оцінок (3.2) або форми і розмірів матриці Грама (3.3) спільної довірчої області, куди з певною довірчою ймовірністю потрапляють кінцеві оцінки параметрів.

Алгоритм оптимального планування складається з таких операцій:

1. Виходячи з апріорної інформації про $\lambda(t)$, характеристик вимірювальних каналів, характеристик експериментальної установки, температурного діапазону дослідження, можливого числа вимірювань, кількості термодетекторів, складається модель вектора вимірювань на підставі прийнятих еталонних значень $\lambda(t)$.
2. За формулами (3.3) і (3.4) обчислюють функції чутливості, для елементів матриці Грама і матриці дисперсій-коваріацій з еталонними значеннями $\lambda(t)$.

3. За формулою (3.6) розраховуються інтегральні оцінки похибок параметрів. При цьому $\sigma_i^2 = \text{const}$ і ваги $G_i = 1$ для всіх i . Довірча ймовірність $1 - \alpha$ приймається рівній 0,96. Також при розрахунку інтервальних оцінок похибок визначається ступінь обумовленості матриці Грама.

4. Проводиться аналіз знайдених значень дисперсій σ_{λ}^2 оцінок $\bar{\lambda}_j$ – діагональних елементів матриці дисперсій-коваріацій (3.2). При цьому аналізується відносна середньоквадратична похибка оцінки шуканих параметрів, що розраховується за формулою:

$$\delta\lambda_j = \frac{\sigma_{\bar{\lambda}_j}}{\bar{\lambda}_j} 100 \% \dots \dots \dots (3.7)$$

Згідно з критеріями оптимальності планів експерименту [15], вибір плану може проводитися, виходячи з мінімуму суми відносних помилок оцінок. Слід зазначити, що знайдені з (3.2) σ_{λ}^2 відповідають мінімуму похибок, досяжному для даного плану експерименту. Найбільшу величину – оцінку похибок "зверху" – дають інтервальні оцінки згідно (3.6).

5. Варіюється, при фіксації інших будь-якої один або група факторів експерименту і повторюється виконання пунктів 1-4.

Варіювання факторів закінчується при досягненні необхідної точності оцінок λ_j , або при перебірці всіх можливих реалізованих варіантів.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕТРИВКОГО МАТЕРІАЛУ В ТОПЦІ КУ

В експерименті досліджується залежність $\lambda(t)$ вогнетриву в діапазоні температур 20.....1200 °С ($r=5$ – кількість вузлів апроксимації $\lambda(t)$).

Планування експерименту зводиться до апріорного аналізу впливу на оцінки $\hat{\lambda}_j$ наступних експериментальних факторів: число і місце розташування первинних термоперетворювачів. Також, в залежності від зазначених факторів, визначається ступінь γ обумовленості матриці H^TGH , величина якої пов'язана з $\hat{\lambda}_j$.

Приймаємо включення котла з холодного стану. В якості початкових умов приймемо рівномірний розподіл температур за зразком $T(\tau=0) = 20$ °СК. Моделюються варіанти нагріву з граничними умовами II роду, в яких досліджувані зразки нагріваються до 1200 °С за 720 с, а граничні умови II роду задаються у вигляді: $q_1 = q_1(\tau)$, $q_2(\tau) = 0$, де $q_1 = 0,45 \cdot 10^4$ Вт/м².

Зміна температур зразка вогнетриву при нагріванні наведена на рис.4.3. Максимальна температура нагріву $T_{3K} = 1200$ °С, час нагріву $\tau = 720$ с.

4.1 Результати планування деяких факторів експерименту

На рис.4.1 наведені середньо квадратичні похибки $\delta\lambda_j$ кожного з шуканих коефіцієнтів λ_j сплайн-апроксимації $\lambda(t)$, обчислені за формулою (3.2) при зміні координати установки термоперетворювача по всій довжині зразка від першого до останнього блоку. Таким чином можна визначити ділянки зразка, вимірювання температур яких забезпечать найбільшу точність оцінки для кожного λ_j .

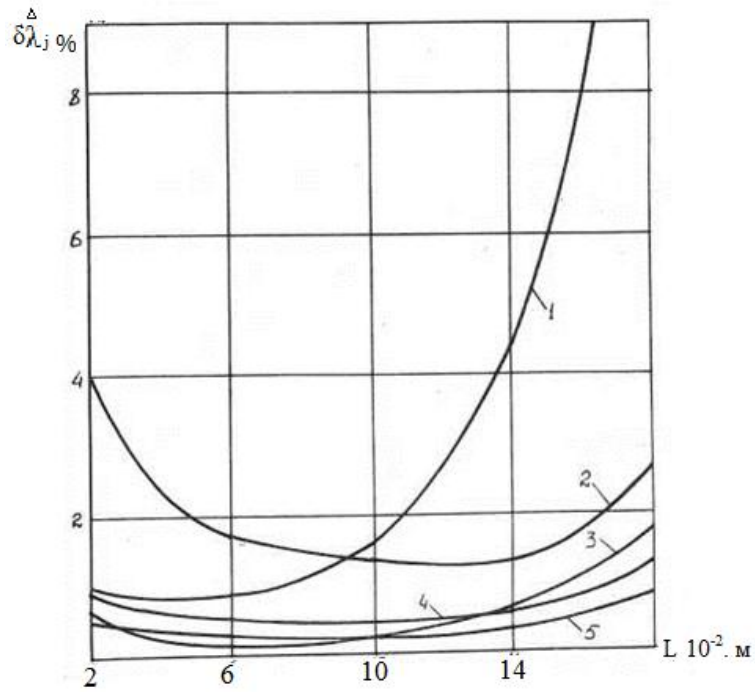


Рис. 4.1- Априорні відносні середньоквадратичні похибки $\Delta \lambda_j$ в залежності від місця розміщення термометрового вимірювача в досліджуваному зразку. Тут: 1 – λ_1 ; 2 – λ_2 ; 3 – λ_3 ; 4 – λ_4 ; 5 – λ_5 .

На рис. 4.2 наведені величини сумарної (формула (2.4)) середньоквадратичної похибки $\delta \lambda(T)$ при розташуванні термометрових вимірювачей по висоті зразку (в блоках 2, 3, 5, 7).

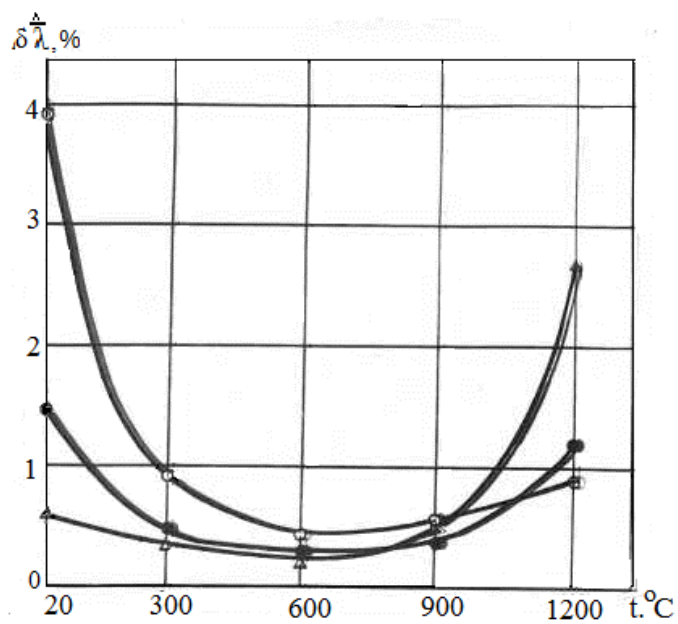


Рис. 4.2- Априорні відносні середньоквадратичні похибки $\overline{\delta\lambda}$ (Т) в залежності від місця розміщення термоперетворювача в різноманітних блоках зразку. Тут: \circ – блок №2; \bullet – блок №5; \triangle – блок №7.

Величини інтервальних похибок $\Delta\lambda_j$ шуканих оцінок λ_j , розраховані за формулою (3.6) наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Величини априорних інтегральних похибок, $\Delta\lambda_j, \text{Вт} / \text{м}^2 \text{ К}$ досліджуваного матеріалу в залежності від місця (блоку) розташування термоперетворювачів

Матеріал	Муллітокорундовий вогнетрив високопористий				
Номер j вузла апроксимації	1	2	3	4	5
Номер блоку	Априорна інтегральна похибка, $\Delta\lambda_j, \text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$				
2	0,210	0,040	0,020	0,030	0,040
3	0,120	0,020	0,010	0,020	0,030
5	0,080	0,020	0,010	0,020	0,050
7	0,070	0,020	0,020	0,020	0,120
9	0,080	0,030	0,020	0,040	0,140

У свою чергу, розрахована величина ступеня обумовленості матриці Грама в залежності від розташування термоперетворювача, приведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Ступінь обумовленості γ матриці Грама в залежності від місця (блоку) розташування термоперетворювача

Матеріал	Муллітокорундовий вогнетрив високопористий				
Номер блоку	1	2	3	4	5
γ	2045	1746	1408	1197	1055

На рис. 3.3 наведені величини сумарної (відповідно до формули (2.4)) середньоквадратичної похибки $\overline{\delta\lambda}$ (Т) при розташуванні термоперетворювачів по висоті зразка (в блоках 7; 7 і 9; 7, 5 і 9).

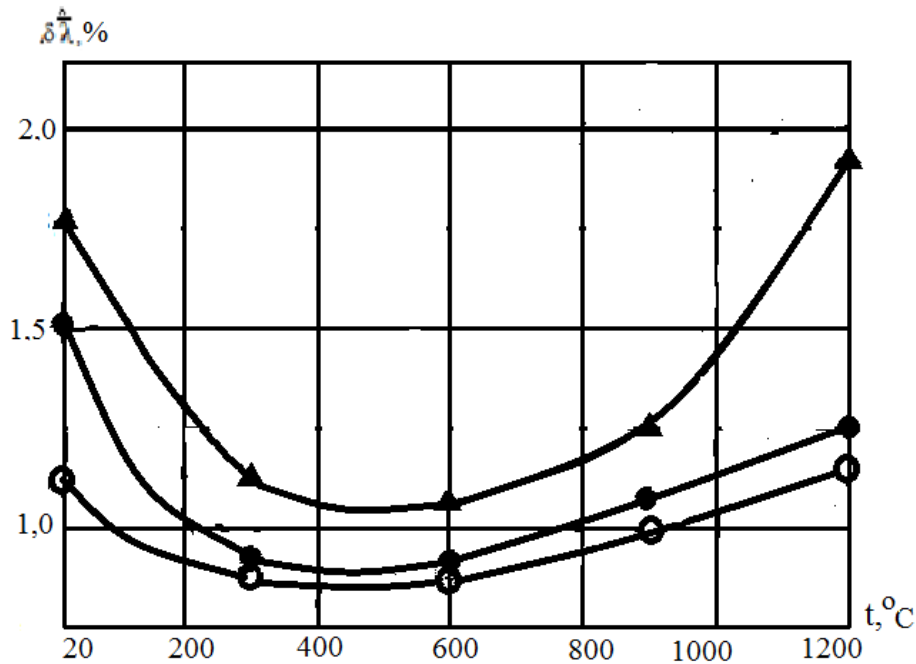


Рис. 4.3 - Апріорні відносні середньоквадратичні похибки $\delta\lambda(T)$ при використанні одного, двох або трьох термоперетворювачів, які встановлені в різних блоках зразку. Δ - блок 7, \bullet - блоки 7 та 9; \circ - блоки 7, 5 та 9.

Величини апріорних інтегральних похибок, $\Delta\lambda_j, \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}$ досліджуваного матеріалу в залежності від кількості термоперетворювачів наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Величини апріорних інтегральних похибок, $\Delta\lambda_j$ досліджуваного матеріалу в залежності від кількості термоперетворювачів

Матеріал	Мулітокорундовий вогнетрив високопористий				
Номер j вузла апроксимації	1	2	3	4	5
Кількість датчиків (номер блоку)	Апріорна інтегральна похибка, $\Delta\lambda_j, \text{Вт}/\text{м}^2 \text{К}$				
1 (9)	0,080	0,030	0,020	0,040	0,140
2 (7,9)	0,070	0,014	0,014	0,025	0,040
3(7,5,9)	0,062	0,012	0,012	0,020	0,033

ВИСНОВКИ

На підставі результатів виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1) Отримані метрологічно забезпечені оцінки похибок параметричної ідентифікації теплопровідності в залежності від розташування термоперетворювача по висоті зразка досліджуваного матеріалу. Показано, що при реалізації оптимального плану експерименту сумарна середньоквадратична похибка теплопровідності не перевищує 2 %, а інтервальні похибки коефіцієнтів апроксимації лежать в межах 1...8 %.

2) Оцінено ступінь обумовленості γ матриці Грама досліджуваної тепловимірювальної системи, величина якої лежить в межах 1050... 2050, що забезпечує необхідну точність ідентифікації теплопровідності.

3) Досліджено величину сумарної середньоквадратичної похибки теплопровідності в залежності від кількості використовуваних одночасно термоперетворювачей, наявних в різних перетинах по висоті зразка. Розглянуто порівняльне використання одного, двох і трьох термоперетворювачів. Показано, що позитивний ефект від використання другого термоперетворювача не однаковий для різних температурних діапазонів - в залежності від перетину (номера блоку) він змінюється в межах від 1,8 ... 2,25 рази (блок 9) до 1,25 ... 1,45 рази (блок 7). При збільшенні числа термоперетворювачей до трьох, забезпечується менший позитивний ефект - 1,1...1,25 рази, ніж збільшення їх числа від одного до двох. З отриманих результатів, зокрема, слід: використання двох термоперетворювачів зменшує похибки в середньому до 40 %, використання трьох - до 15 % в порівнянні з використанням одного термоперетворювача.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Чорнобильська АЕС, Вуглегірська ТЕС... Хто на черзі? А. А. Акімов, / «Зеркало недели» Україна. випуск 15, 19.04. 2013.
2. Голубцов В. А. Эксплуатация котельных установок электростанций. Учеб. пособие для энергетич. вузов. / В. А. Голубцов, П. П. Елизаров. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 612 с.
3. Гулей А. Б. Оценка зависимости температуры дымовых газов на выходе из топки парового котла ТП-81 от нерасчетных присосов воздуха через неплотности в ограждении топки/ А. Б. Гулей, Е. П. Ключка.// Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Х., - 2014. - №4. - С. 25-37.
4. Берман Р. Теплопроводность твердых тел / Р. Берман М.: Мир, 1979. - 286 с.
5. Симбирский Д. Ф. Температурная диагностика двигателей (Пленочная термометрия и оптимальные оценки) / Д. Ф. Симбирский «Техніка», 1976. – 208 с.
6. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т.: приложения / Ю. М. Мацевитый. – Киев: Наукова думка, 2003. – Т.2
7. Симбирский Д. Ф., Гулей А. Б. Оптимальное планирование экспериментально-расчетного определения теплопроводности твердых тел в режиме нестационарного нагрева //ИФЖ. – 1983. – Т. 45, №5, С. 733-737.
8. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: в 4-х т./Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев, и др. –3-е изд., перераб. и расширен. .М.:Наука, - 1979.
9. Литовский Е. Я.Теплофизические свойства огнеупоров. Справочное издание / Е. Я.Литовский, М. А. Пучкелевич. – М.: Металлургия, - 1982. – 152 с.
10. Глушков В. М. Программное обеспечение электронно-вычислительных машин МИР-1 и МИР-2 / В. М. Глушков, И. Н. Молчанов, Б. Н. Брусникин. - Киев: Наукова думка, - 1976. – 280 с.

11. Проненко В. Н. Метрология в промышленности / В. Н. Проненко Р. В. Якирин. – Киев: Техніка, - 1979. – 233 с.
12. Коздоба Л. А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л. А. Коздоба, П. Г. Круковский. – М.: Машиностроение, - 1982. – 360 с.
13. Олейник А. В. Оптимальные оценки при динамических измерениях лучистых тепловых потоков / А. В. Олейник // Экспериментальные методы термодинамики газотурбинных двигателей: тематический сборник научных трудов, вып.3. – Харьков, Харьковский авиац. ин – т, - 1976. – С. 139-147.
14. Розенвассер Е.Н., Чувствительность систем автоматического управления/ Е.Н. Розенвассер, Р.М.Юсупов. Л.: Энергия, - 1969. — 208с.
15. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский . – 2-е изд., перераб. и доп . – М. : Наука, - 1976 . – 279 с.