

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

ТОМІЛІН ЄВГЕНІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 681.5.08

**ПОБУДОВА ІВС ОЦІНКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФІЛЮ ПРОХІДНИХ
ПЕЧЕЙ НА БАЗІ ВІРТУАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СЕРТИФІКОВАНИХ
ПРИСТРОЇВ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк–2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет», Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Чичикало Ніна Іванівна,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
професор кафедри електронної техніки (м. Донецьк)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яковенко Валерій Володимирович,
ДВНЗ «Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля»,
завідувач кафедри електромеханіки (м. Луганськ)

доктор технічних наук, доцент
Федоров Євгеній Євгенійович,
ДВНЗ «Донецька академія автомобільного
транспорту»,
завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних
систем (м. Донецьк)

Захист відбудеться «03» жовтня 2013р. о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.03 в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, корп.8, ауд. 8.704.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Донецького національного технічного університету за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, корп. 2.

Автореферат розіслано «31» серпня 2013 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 11.052.03,
к.т.н., с.н.с.

Мокрий Г.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією із задач металургійної галузі важкої промисловості України є підвищення якості технологічних процесів термічної обробки заготовок в прохідних печах (ПП), яке полягає в підвищенні точності визначення температур заготовок, оцінці технічних і теплофізичних параметрів кладки. Аналіз відомих рішень в області побудови систем контролю температур в ПП показав, що більшість з існуючих систем забезпечує лише функції низького рівня контролю. До цих функцій відносяться: збір, обробка, зберігання і виведення інформації про середню температуру газових зон печі, а також вимірювання температур поверхні заготовок (ПЗ), що нагріваються, лише в зоні заключного нагріву, або відразу після виходу з неї.

Проте такі системи не дозволяють оцінювати температурний стан заготовок на стадіях попереднього нагріву із заданою технічними умовами точністю. Також ці системи не виконують контролю температурного і технічного стану кладки ПП. Це може привести до пошкодження кладки печі з утворенням кризних тріщин, а, отже: до порушення санітарно-гігієнічних норм в цеху, обумовлених вибиванням продуктів горіння через кладку; аваріям при можливих руйнуваннях корпусу печі; погіршенню якості процесу термічної обробки заготовок. Внаслідок цього виникає невідповідність вимогам ГОСТ і ДСТУ вироблюваних з них деталей машин, що в результаті може призвести до виходу з ладу машини, що містить неякісні деталі. Розв'язання вказаної задачі можливо за допомогою інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), побудова яких ґрунтується на теоретичних і експериментальних дослідженнях, виконаних за допомогою пакетів прикладних програм, з подальшим отриманням і застосуванням віртуальних моделей теплофізичних процесів печі і використанням відповідних сертифікованих вимірювальних пристроїв в експериментах, виконаних в промислових умовах.

Підвищення точності визначення температур всередині активної зони ПП виконується на підставі встановленого взаємозв'язку між температурами в технологічних точках вимірювання (ТТВ) і на ПЗ з урахуванням впливу складного газового випромінююче-поглинаючого середовища робочого простору, радіаційно-конвективного характеру нагріву тіл, множинного перевідбиття випромінювання у внутрішньому просторі, залежності геометрії активної зони від розмірів заготовок, що нагріваються. На наступному етапі в сталому температурному режимі методом ідентифікації невизначеності вимірювань температур в ТТВ з подальшою корекцією зведена до рівня невиключеного залишку систематична складова методичної похибки (ССМП). Таким чином, дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі розробки ІВС підвищеної точності з розширеними функціональними можливостями, яка забезпечує підвищення якості технологічних процесів термічної обробки заготовок в ПП.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до тематичного плану Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» по темі НДР № Н-11-11 (номер держреєстрації 0111U007025) «Підвищення ефективності електронних приладів і систем». Автор брав участь у виконанні робіт по названій темі як виконавець.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є підвищення точності і розширення функціональних можливостей ІВС оцінки температурного профілю ПП, побудованої на базі сертифікованих пристроїв і віртуальних моделей теплофізичних процесів, шляхом ідентифікації виду похибок

з наступною корекцією результатів контролю і виконання безперервної оцінки технічного стану кладки.

Для досягнення мети поставлено і розв'язано наступні задачі:

- аналіз існуючих вимірювальних систем і особливостей застосування засобів визначення температур внутрішнього простору ПП;
- розробка методу ідентифікації невизначеності вимірювань температур в ТТВ для корекції результатів контролю температур ПЗ;
- розробка методу прискореного визначення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання об'ємних зон теплової моделі ПП;
- розробка методу оцінки технічного стану кладки ПП на основі врахування теплофізичних процесів та інформації від сертифікованих пристроїв.

Об'єкт дослідження: процес визначення температур в прохідній печі на основі встановлення взаємозв'язку між температурами в технологічних точках вимірювання, в газових об'ємах, на поверхні заготовок та на поверхні кладки з використанням інформаційно-вимірювальної системи на базі віртуальних моделей та сертифікованих пристроїв.

Предмет дослідження: інформаційно-вимірювальна система оцінки температурного профілю, побудована на основі розроблених положень.

Методи дослідження: методологія виконання метрологічних робіт для ідентифікації невизначеності похибок відповідно до міжнародних стандартів ISO 5725-1 при дослідженні процесів, що відбуваються в ПП; елементи теорії променистого теплообміну, що застосовуються в розділі 2 для отримання значень геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання об'ємних зон; елементи теорії теплопровідності; метод вимірювання щільності теплових потоків; різницеві схеми розв'язання задач нестационарної теплопровідності, що застосовуються в розділі 3 для розробки методу контролю технічного стану кладки теплового агрегату.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- встановлено набір вхідних параметрів і взаємозв'язок між ними з урахуванням складного радіаційно-конвективного характеру теплообміну для побудови теплофізичної моделі процесів ПП, що дало можливість визначити склад ІВС;
- вперше запропоновано метод визначення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання між об'ємними і поверхневими зонами, а також між об'ємними зонами моделі теплової роботи печі, відмінний тим, що як елементарна одиниця інтегрування використовується нескінченно тонкий паралелепіпед, а межі інтеграла беруться по межах об'ємної зони, що дозволило враховувати вплив газових об'ємних зон складної форми на процеси теплообміну в ПП;
- розроблено новий підхід до побудови ІВС визначення температурного стану ПП, який дозволяє встановити взаємозв'язок між температурами в ТТВ, в газових об'ємах, на ПЗ і на поверхні кладки, невиключеним залишком ССМП, розвиває зональний метод опису теплофізичних процесів ПП;
- вперше запропоновано метод контролю технічного стану кладки теплового агрегату на базі ІВС оцінки температурного профілю, відмінний тим, що контроль стану здійснюється шляхом сумісного визначення температур зовнішньої і внутрішньої сторін кладки печі з подальшою оцінкою перевищення значень теплових втрат через огорожувальні конструкції теплового агрегату, що дає можливість попереджати виникнення аварійних ситуацій на об'єкті.

Практичне значення результатів, отриманих в процесі виконання роботи, полягає в наступному:

- розроблена методика прискореного визначення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання між об'ємними і поверхневими зонами, а також між об'ємними зонами, застосовується при дослідженні теплообміну в аналогічних об'єктах;
- запропонована методика аналізу технічного стану кладки ПП, дозволяє забезпечувати контроль якості робочого стану печі, відстежувати її поточний технічний стан і встановлювати момент початку проведення ремонтних робіт;
- методики оцінки технічного стану кладки теплового агрегату і значень щільностей потоків теплових втрат використовуються при оцінці поточного технічного стану вогнетривких огорож топок котельних установок ТОВ «Надія»;
- матеріали роботи використовуються при визначенні розподілу температур по перерізу коксового пирога в батареях ПАТ «ЄВРАЗ Дніпродзержинський КХЗ»;
- методика встановлення значень ССМП може використовуватися для підвищення точності визначення температури ПЗ в аналогічних ПП;
- запропонований спосіб оцінки значень температур ТТВ придатний при зміні сортаменту заготовок і не вимагає коректування положення пристроїв вимірювання температур в просторі ПП, оскільки модель враховує цей чинник;
- методики оцінки технічного стану кладки ПП і температур в ТТВ, а також значень щільностей потоків теплових втрат, можуть бути рекомендовані до використання на підприємстві ПАТ «МК «Азовсталь» у товстолистовому, крупносортовому та рейкобалковому цехах;
- розроблені результати представлено у вигляді монографії, електронний варіант якої опубліковано в мережі Інтернет і використовується в навчальному процесі на кафедрі електронної техніки при виконанні курсового проектування по дисципліні «САПР» і «Проектування НАП».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати дисертації, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Серед них: створення наукових основ методології визначення температур ПП на базі математичних моделей і сертифікованих пристроїв; розробка методів отримання геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання об'ємних зон; розробка методу аналізу технічного стану кладки печі; розробка моделі стаціонарного нагріву циліндричних тіл в просторі ПП, яка дозволяє одержувати значення температур в ТТВ активної зони теплового агрегату; розробка методу ідентифікації невизначеності похибок визначення температур ПЗ.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на наступних наукових конференціях:

- друга міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2009)» (м. Київ, «Національний авіаційний університет», 25-28 травня 2009 р.);
- дванадцята міжнародна молодіжна наукова конференція «Севергеоэкотех» (м. Ухта, «Ухтинский государственный технический университет», 16-18 травня 2011 р.);
- одинадцята міжнародна науково-практична конференція «Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих» (м. Донецьк, «Донецький національний технічний університет», 17-20 травня 2011 р.);

– восьма міжвузівська науково-практична конференція студентів і молодих учених «Інформаційні технології і сучасність» (м. Донецьк, «Європейський університет», 18 травня 2011 р.);

– четверта міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2011)» (м. Київ, «Національний авіаційний університет», 23-25 травня 2011 р.);

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 14 друкованих працях, з них 1 монографія, 8 статей у спеціалізованих наукових виданнях (3 – у наукових журналах, 5 – в збірках наукових праць), 5 – тези доповідей на наукових конференціях.

Структура і об'єм дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Повний об'єм дисертації – 149 сторінок, в яких головний зміст викладено на 130 сторінках друкованого тексту, має 59 рисунків і 15 таблиць. Список використаних джерел складається зі 109 найменувань.

ГОЛОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ «Аналіз промислових печей та інформаційно-вимірювальних систем як об'єктів математичного моделювання та визначення температур активної зони» присвячений аналізу особливостей визначення температур активних зон і моделювання теплових процесів в існуючих промислових енерготехнологічних агрегатах. Виконано аналіз типів промислових печей і обґрунтовано вихідні дані для побудови ІВС оцінки температурного профілю. Проаналізовано методи моделювання теплових процесів промислових печей. Визначено основні чинники, що впливають на результати вимірювань температур заготовок, а також основні джерела похибок вимірювання. В ході аналізу було виявлено, що найбільші значення похибок виникають при визначенні температур ПЗ в зоні попереднього нагріву. Необхідні показники точності вимірювання температур ПЗ, що нагріваються, забезпечуються лише в зоні завершального нагріву за допомогою пірометрів. Для корекції збурень, що вносяться випромінюванням проміжного газового середовища та кладки печі, а також наявністю конвективного теплообміну, застосовується складна захисна апаратура пірометра, яка охолоджується і продувається інертними газами та подальша складна обробка отриманих даних. В дисертаційній роботі пропонується здійснювати облік впливу перерахованих збурюючих чинників за допомогою ІВС, що базуються на віртуальних моделях і сертифікованих пристроях.

Після аналізу існуючих методів вимірювання температур ПЗ і визначення основних чинників, що впливають на результати вимірювання, був вибраний контактний метод визначення температур заготовок, що нагріваються в прохідних тунельних печах. Контактними методами вимірюють середні температури активної зони печі, або температури тіл, що нагріваються, розташовуючи датчики безпосередньо на їх поверхні. Вибір даного типу датчиків обумовлений їх дешевизною і легкістю установки на досліджуваний об'єкт, порівняно з безконтактними датчиками, а також відсутністю необхідності внесення конструктивних змін у вимірювальну установку при зміні геометричних параметрів заготовок, оскільки геометричні і теплофізичні параметри теплового агрегату і тіл, що нагріваються, враховуються віртуальною моделлю. Віртуальною моделлю

лю будемо називати математичну модель досліджуваного об'єкту, яку реалізовано на базі віртуальних приладів в програмно-керованих системах збору даних.

Другий розділ «Розробка методів визначення параметрів процесів теплообміну в прохідній печі та алгоритмів їх врахування» містить розробку математичної моделі теплової роботи ПП. Розроблено методику прискореного визначення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання між плоскими і об'ємними зонами, а також між двома об'ємними зонами. Розглянуто кількісну оцінку результатів застосування методики визначення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання. Запропоновано алгоритм обліку впливаючих чинників в газових зонах на процеси теплообміну.

Модель активної зони ПП, яка використовується при моделюванні теплових процесів, зображена на рис. 1.

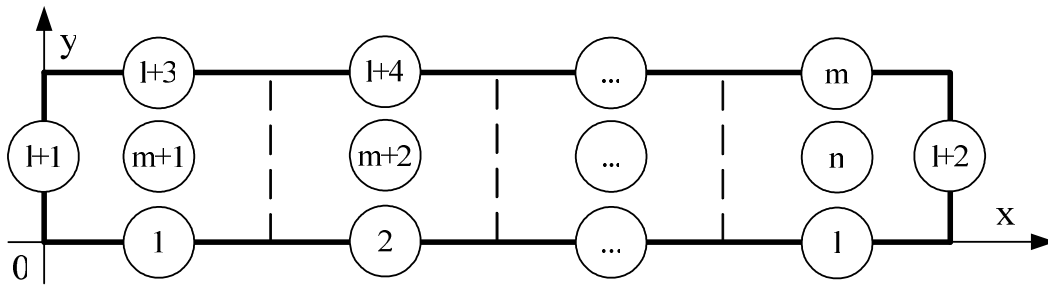


Рисунок 1. Модель активної зони досліджуваної ПП

На рис. 1 позначено зони: (1...l) – поверхні сукупності заготовок; (l+1...m) – поверхні кладки; (m+1...n) – газові об'єми.

Загальна форма запису математичної моделі теплового агрегату:

$$\sum_{k=1}^n (a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_{k,i} \cdot T_k) + g_i^0 = Q_i^p, i = (1...l), \quad \sum_{k=1}^l a_{k,i} \cdot T_k^4 + \sum_{k=l+1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4 = Q_i, i = (l+1...n),$$

$$\sum_{k=1}^l (a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_{k,i} \cdot T_k) + \sum_{k=l+1}^n (a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_{k,i} \cdot T_k) + g_i^0 + Q_i^v = Q_i, i = (m+1...n),$$

де $a_{k,i}$ – коефіцієнти радіаційного теплообміну;

$g_{k,i}$ – коефіцієнти конвективного теплообміну;

T_k – температура зони;

Q_i^p – результуючий тепловий потік;

Q_i – власний потік тепловиділень;

Q_i^v – потік тепловиділень в об'ємній газовій зоні.

При цьому:

- зони 1...l – зони першого роду (задано їх температури T_i);
- зони l+1...m – зони другого роду (задано значення потоків результуючого випромінювання Q_i^p , які мають значення потоків теплових втрат);
- зони m+1...n – зони другого роду (відомі значення результуючих теплових потоків \tilde{Q}_i , які мають значення потужності тепловиділень).

Необхідно знайти:

- температури $T_i, i=l+1...n$;

- результуючі теплові потоки Q_i^p , $i=1\dots l$;
- температури T_i , $i=1\dots l$.

Блок-схему алгоритму знаходження температур поверхневих та об'ємних зон моделі ПП представлено на рис. 2, а на рис. 3 представлено схему її вхідних параметрів.

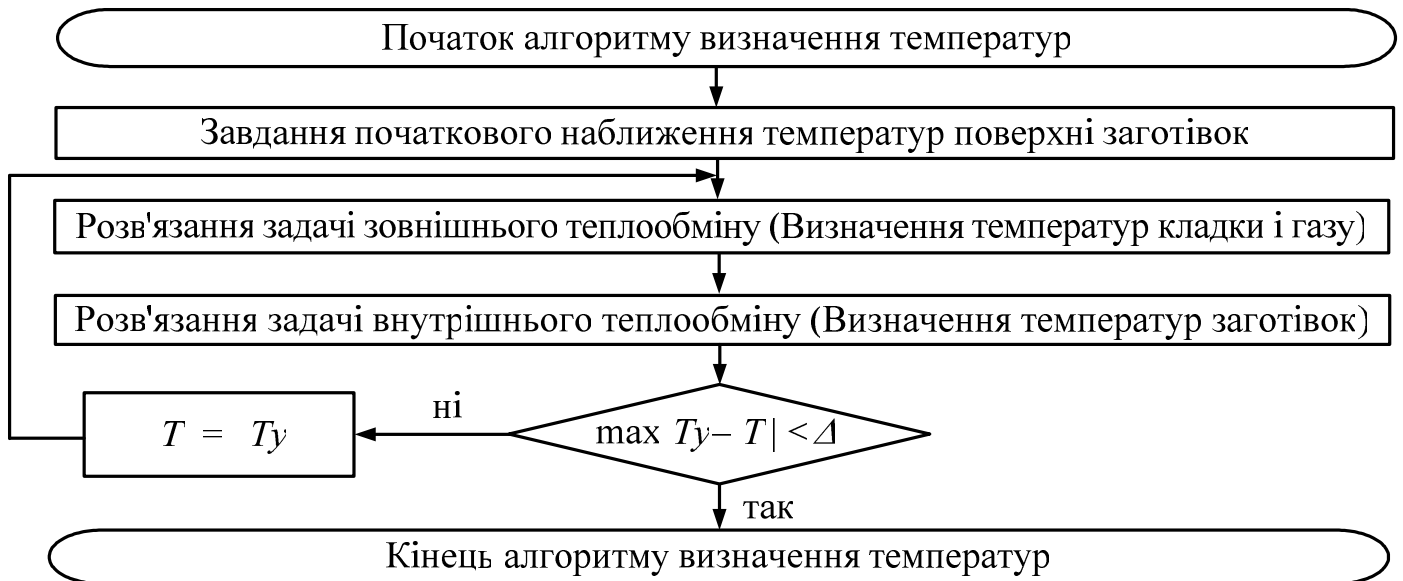


Рисунок 2. Блок-схема алгоритму знаходження температур активної зони ПП

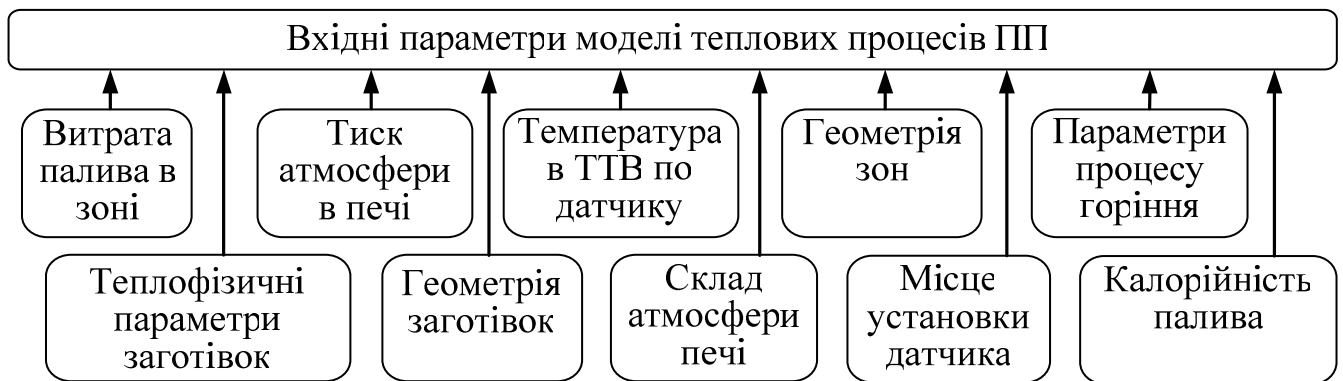


Рисунок 3. Вхідні параметри моделі теплових процесів ПП

Одними з ключових змінних математичної моделі теплової роботи печі є коефіцієнти радіаційного теплообміну $a_{k,i}$ між об'ємними газовими зонами, плоскими зонами кладки і зонами ПЗ. Для їх знаходження необхідно визначити геометричні кутові коефіцієнти випромінювання $\Phi_{k,i}$, потім узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання $\Psi_{k,i}$ і на їх основі – розв'язувальні узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання $\Psi_{2,k,i}$.

Для врахування взаємного опромінювання плоских і об'ємних зон визначимо значення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання між ними. Для цього використаємо відому формулу, проте один інтеграл в ній візьмемо за площею F_1 , а другий – за об'ємом V_2 :

$$\varphi_{1,2} = \int \int_{F_1 V_2} \frac{H_2 \cdot \Delta L}{\pi \cdot r^4} dV_2 dF_1 = \int \int_{F_1 V_2} \frac{H_2 \cdot \Delta L}{\pi \cdot (H_2^2 + \Delta L^2 + \Delta S^2)^2} dV_2 dF_1, \quad (1)$$

де позначено поточні значення: H_i – висоти, L_i – довжини, S_i – ширини; значення кроку по: ΔL – довжині, ΔS – ширині, ΔH – висоті; r – відстань між поточними координатами елементарних об'ємів і площин.

Для знаходження значень коефіцієнтів випромінювання між двома газовими об'ємами, візьмемо повторний інтеграл по об'ємах V_1 і V_2 :

$$\varphi_{1,2} = \int \int_{V_1 V_2} \frac{\Delta L \cdot \Delta L}{\pi \cdot r^4} dV_2 dV_1 = \int \int_{V_1 V_2} \frac{\Delta L^2}{\pi \cdot (\Delta H^2 + \Delta L^2 + \Delta S^2)^2} dV_2 dV_1, \quad (2)$$

де позначено поточні значення: H_i – висоти, L_i – довжини, S_i – ширини; значення кроку по: ΔL – довжині, ΔS – ширині, ΔH – висоті; r – відстань між поточними координатами елементарних об'ємів.

Однак обчислення кутових коефіцієнтів по формулах (1) і (2) вимагає великих витрат машинного часу. Тому частина кутових коефіцієнтів обчислюється за допомогою відомих формул (3) – (5), а частина – за допомогою формули (3), з введенням додаткового поправкового коефіцієнта: (3) – коефіцієнт опромінювання між плоскою бічною зоною 1+1 або 1+2 і об'ємними зонами $m+1 \dots n$ (рис. 1); (4) – коефіцієнт випромінювання між зонами ПЗ, що нагріваються, і зонами на поверхні зведення теплового агрегату; (5) – коефіцієнт опромінювання між плоскими зонами 1...1 ПЗ або 1+3... m поверхні зведення і об'ємними газовими зонами $m+1 \dots n$:

$$\varphi_{l+1, m+2 \dots n}^* = \frac{1}{H} \cdot \left(\sqrt{(x \cdot L_1)^2 + H^2} - x \cdot L_1 \right), \quad (3)$$

$$\varphi_{k,i} = \frac{1}{2L_1} \left[\sqrt{(x+L_1)^2 + H^2} + \sqrt{(x-L_1)^2 + H^2} - 2\sqrt{x^2 + H^2} \right], \quad (4)$$

$$\varphi_{k,i} = \frac{1}{2L_1} \left[L_1 + \sqrt{x^2 + H^2} - \sqrt{(x+L_1)^2 + H^2} \right], \quad (5)$$

де L_1 – ширина зони, m ; H – висота між ПЗ, що нагрівається і кладкою зведення, m ; x – зсув між зонами, m ; i та k – номери зон, які розглядаються; $\varphi_{k,i}$ – характеристика ефективності випромінювання з зони k на i .

За допомогою формули (3) та поправкового коефіцієнта можна знаходити геометричні кутові коефіцієнти опромінювання між двома газовими об'ємними зонами $m+1 \dots n$:

$$\varphi_{m+1, m+2 \dots n}^* = \frac{1}{H} \cdot \left(\sqrt{(x \cdot L_1)^2 + H^2} - x \cdot L_1 \right) \cdot \left[\frac{H}{\sqrt{(x \cdot L_1)^2 + H^2}} + L_1 \right]$$

Третій розділ «Розробка методів оцінки температурного профілю прохідних печей для побудови ІВС» містить розробку методики непрямого вимірювання температур внутрішньої сторони поверхні кладки ПП. Проведено дослідження інерційності процесів теплопередачі через огорожуючі конструкції теплового агрегату. Розроблена методика оцінки технічного стану пічної кладки і щільностей потоків теплових втрат через неї, яка дозволяє використовувати значення щільностей потоків для корекції температурного профілю активної зони. Розроблено математичну модель оцінки температур в ТТВ.

Запропоновано методику непрямого вимірювання значень температур поверхні внутрішньої сторони кладки t_{c1} , по значеннях температур на поверхні зовнішньої сторони кладки t_{c3} , яка складається з наступних етапів:

- вимірювання температури t_{c3} поверхні зовнішньої сторони стінки кладки;
- вимірювання щільності потоків теплових втрат q ;
- визначення значення температури на межі поділу шарів кладки за формулою $t_{c2} = t_{c3} + q \cdot (\delta_2 / \lambda_{c2})$;
- визначення значення температури внутрішньої сторони кладки за формулою:

$$t_{c1} = \sqrt{(1/b + t_{c2})^2 + (2 \cdot q \cdot \delta_1) / (\lambda_{oc1} \cdot b_{c1})} - 1/b.$$

Тут λ – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/(м·°К); b – коефіцієнт кута нахилу прямої, що апроксимує залежність коефіцієнту λ від температури: $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$; q – щільність теплового потоку крізь плоску стінку, δ – товщина стінки, м.

Після моделювання процесів теплопередачі крізь стінку кладки виявилось, що запропонована методика неприйнятна для застосування через надзвичайно велику, з точки зору задач контролю та управління, інерційність процесів теплопередачі.

Проте була визначена область її застосування для стаціонарних процесів теплообміну, та на її базі побудована методика оцінки стану кладки теплового агрегату (рис. 4):

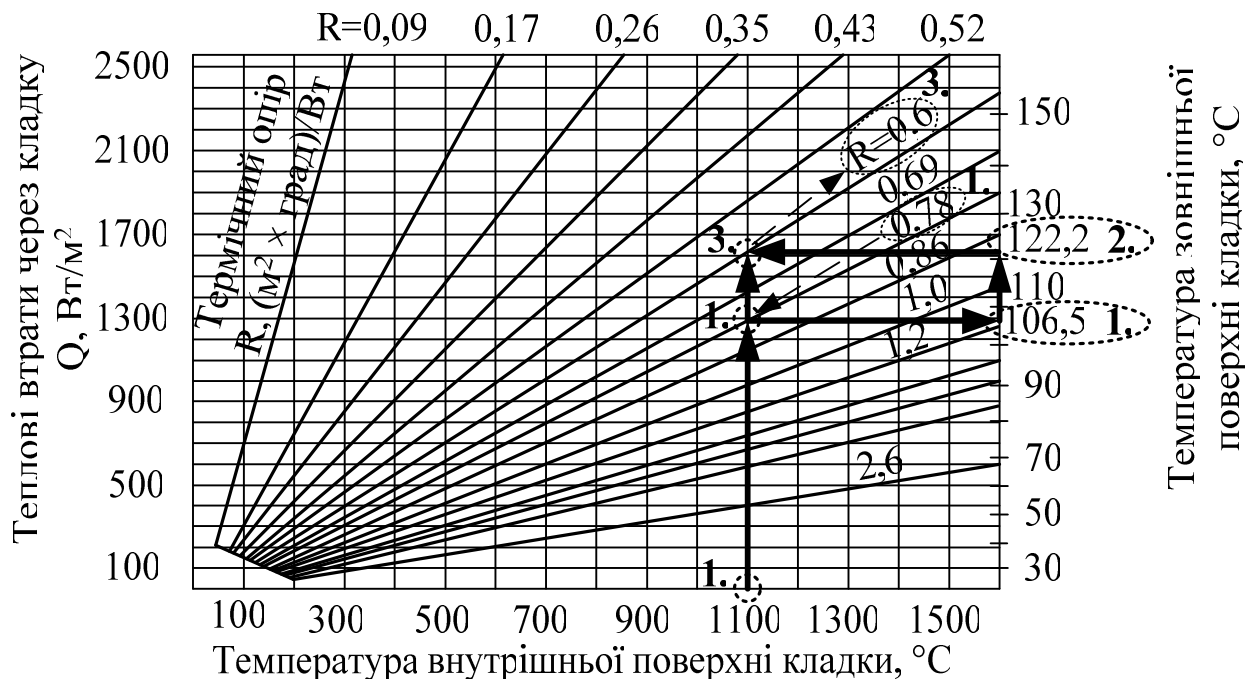


Рисунок 4 Діаграма визначення теплових втрат крізь стіни і відповідні до них температури зовнішньої і внутрішньої поверхонь стін у печей безперервної дії

Вона складається з наступних етапів:

1. Визначення відомими прямими, або непрямыми, методами значень температур на внутрішній стороні огорожувальної конструкції печі.
2. Вимірювання значень температур на зовнішній стороні кладки теплового агрегату.
3. Визначення поточного значення термічного опору і щільностей потоків теплових втрат огорожувальних конструкцій ПП і у разі їх виходу за певні межі – винесення рішення про необхідність початку проведення ремонтно-профілактичних робіт.

В розділі розроблена математична модель оцінки температур в ТТВ – областях простору активної зони теплового агрегату, які зайнято робочим кінцем контактного датчика (термопари). В даному випадку датчик розташований в бічній стінці кладки.

Як модель датчика використовується фарфоровий циліндр. На рис. 5 зображено взаємне опромінювання плоских зон печі и моделі датчика. Довжину його активної частини позначимо як LL .

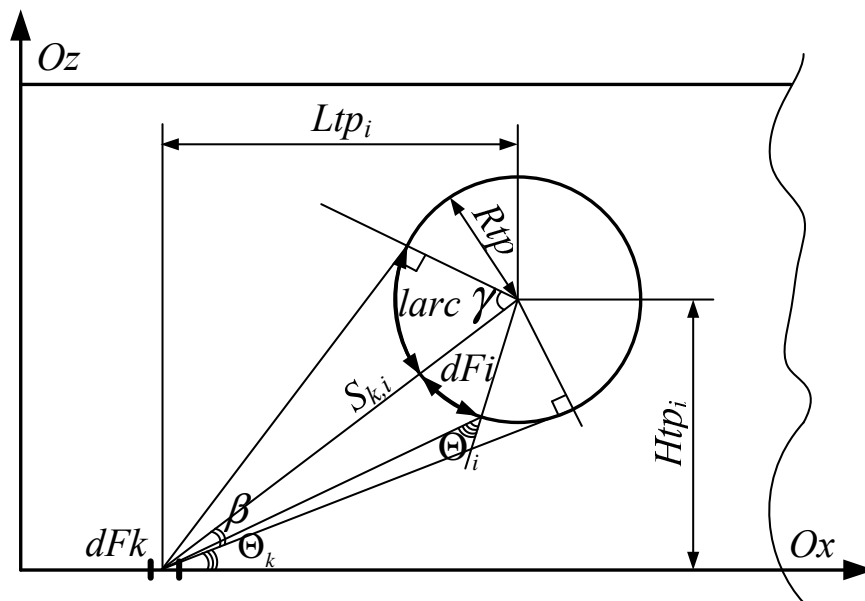


Рисунок 5. До визначення узагальнених кутових коефіцієнтів випромінювання

Спочатку визначимо узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання для моделі датчика і простору печі на основі методики їх визначення для тіл довільної форми:

$$\varphi_{k,i} = \iint_{F_k F_i} \frac{\cos(\Theta_k) \cdot \cos(\Theta_i)}{\pi \cdot s_{k,i}^2} \cdot e^{-k \cdot s_{k,i}} dF_i dF_k,$$

де $s_{k,i}$ – відстань між елементами dF_k і dF_i ; dF_k і dF_i – елементарні площадки; Θ_k і Θ_i – кути між нормаллями до елементів dF_k і dF_i та напрямком $s_{k,i}$; k – середній коефіцієнт поглинання газу на шляху $s_{k,i}$; Rtp – радіус моделі термопари; Ltp_i – поточне значення координати ТТВ по вісі Ox ; Htp_i – поточне значення координати ТТВ температури по осі Oz ; $larc$ – поточне значення довжини дуги кола.

Тоді узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання для простору печі і циліндричного тіла, яке є моделлю датчика, матимуть наступний вигляд:

$$\phi = \int_{|Ltp-Ltp2|}^{|Ltp-L1-Ltp2|} \int_0^{\left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{Rtp}{\sqrt{Htp^2 + Ltp^2}} \right] \right]} \cdot Rtp \cdot \frac{\cos \left[\arctg \left(\frac{Htp}{Ltp} \right) - \text{arcctg}[a] \right]}{\pi \cdot \left[\frac{Larc}{\sin[\text{arcctg}[a]]} \right]} \cdot \cos \left[\frac{Larc}{Rtp} + \text{arcctg}[a] \right]} \times$$

$$\times e^{-\frac{ksred \cdot Larc}{\sin[\text{arcctg}[a]]}} \cdot LL \cdot 2,9dLarc dLtp + \int_{|Ltp-Ltp2|}^{|Ltp-L1-Ltp2|} \int_0^{\left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{Rtp}{\sqrt{Htp^2 + Ltp^2}} \right] \right]} \cdot Rtp \cdot \left(\frac{\cos \left[\arctg \left(\frac{Htp}{Ltp} \right) + \text{arcctg}[a] \right]}{\pi \cdot \left[\frac{Larc}{\sin[\text{arcctg}[a]]} \right]} \right) \times$$

$$\cos \left[\frac{Larc}{Rtp} + \text{arcctg}[a] \right] \cdot e^{-\frac{ksred \cdot Larc}{\sin[\text{arcctg}[a]]}} \cdot LL \cdot 2,9dLarc dLtp \Bigg)$$

де $a = \left(\sqrt{(Htp)^2 + Ltp^2} / Rtp - \cos(Larc/Rtp) \right) / \sin(Larc/Rtp)$, ϕ – узагальнений кутовий коефіцієнт випромінювання; LL – довжина активної частини датчика; $ksred$ – середній коефіцієнт поглинання газу; $s_{k,i}$ – відстань між елементарними площадками dF_k і dF_i ; Θ_k і Θ_i – кути між нормаллями до елементів dF_k і dF_i та $s_{k,i}$; Rtp – радіус термопар; Ltp – поточне значення координати ТТВ температури по осі Ox ; $Ltp2$ – поточне значення координати по загальній довжині печі (вісь Ox); Htp – поточне значення координати ТТВ температури по осі Oz ; $larc$ – поточне значення довжини дуги кола; L_l – довжина поверхні зони (вісь Ox).

Тепер необхідно провести обчислення температур в ТТВ із застосуванням значення щільності теплового потоку q на поверхні циліндричного тіла як граничної умови. Значення q знаходять як суму радіаційних і конвективних складових теплообміну, забезпечуваних кожною зоною:

$$q = \sum_{j=1}^{35} \left[a_{j,36} \cdot (Tn_j^4 - T_{k,n+1}^4) + g_{j,36} \cdot (Tn_j - T_{k,n+1}) \right] + g0_{36} ,$$

де $j=1...35$ – зони моделі розглянутої в дисертаційному дослідженні ПП (згідно рис. 1, для неї $l=11$, $m=24$, $n=35$); коефіцієнти теплообміну між поверхневими і об'ємними зонами j та 36-ю поверхневою зоною моделі датчика: $a_{j,36}$ – радіаційного, $g_{j,36}$ – конвективного; Rtp – радіус моделі датчика; LL – довжина активної частини моделі датчика; $T_{k,n+1}$ – значення температури в k -й момент часу в $n+1$ -й точці координати товщини заготівки (на ПЗ).

Тоді, для розв'язання задачі, використовуємо явну різницеву схему із застосуванням описаної вище граничної умови:

$$T_{k+1,n+1} = T_{k,n+1} + \frac{\Delta t}{0,5 \cdot c \cdot \Delta r} \left[\frac{\sum_{j=1}^{35} \left[a_{j,36} \cdot (Tn_j^4 - T_{k,n+1}^4) + g_{j,36} \cdot (Tn_j - T_{k,n+1}) \right] + g0_{36}}{2\pi \cdot Rtp \cdot LL} \right]$$

$$T_{k+1,1} = T_{k,1} + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{0.5 \cdot c \cdot \Delta r^2} \cdot (T_{k,n+1} - T_{k,n}) + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{0.5 \cdot c \cdot \Delta r \cdot Rtp} \cdot (T_{k,n} - T_{k,n-1}),$$

$$T_{k+1,i} = T_{k,i} + \frac{a1 \cdot \Delta t}{\Delta r^2} \cdot (T_{k,i+1} - 2 \cdot T_{k,i} + T_{k,i-1}) + \frac{a1 \cdot \Delta t}{\Delta r \cdot Rtp} \cdot (T_{k,i} - T_{k,i-1}),$$

де c – коефіцієнт теплоємності, Дж/(м³·К); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град); Δt – крок за часом, с; Δr – крок по товщині, м; температура циліндричного тіла в $k+1$ -й момент часу: $T_{k+1,1}$ – в його середині, $T_{k+1,i}$ – в проміжній, i -й точці, $T_{k+1,n+1}$ – на його поверхні.

Розподіл отриманих температур в ТТВ і температур активної зони по довжині ПП зображено на рис. 6. Тут позначено: T_{Γ} – температура газового середовища; $T_{\text{ПК}}$ – температура поверхні кладки; $T_{\text{Ср}}$ – середня температура зон; $T_{\text{ПЗ}}$ – температура ПЗ; $T_{\text{тп}_1}$, $T_{\text{тп}_2}$, $T_{\text{тп}_3}$, $T_{\text{тп}_4}$, $T_{\text{тп}_5}$, $T_{\text{тп}_6}$ – температури в ТТВ на висоті 0,03; 0,08; 0,125; 0,250; 0,375 і 0,5 м відповідно над ПЗ, температура якої вимірюється.

Значення різниць між температурами в ТТВ і середніми значеннями температур зон, отриманими по моделі, не перевищують 35 °С. Це добре узгоджується з практичними результатами.

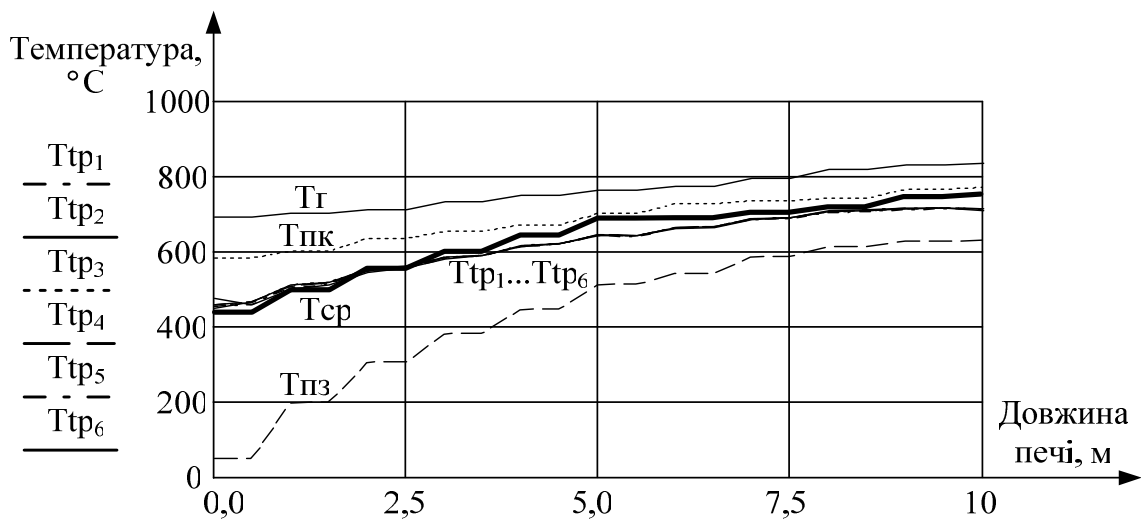


Рисунок 6. Розподіл температур в ТТВ і температур активної зони по довжині теплового агрегату

Четвертий розділ «Розробка віртуальних моделей оцінки температурного профілю та обґрунтування набору сертифікованих пристроїв для побудови ІВС» містить розробку структури ІВС оцінки температурного профілю ПП, побудованої на базі сертифікованих пристроїв. Виконується оцінка метрологічних характеристик компонентів ІВС і методики непрямого вимірювання температур внутрішньої сторони огорожувальної конструкції печі. Розроблено віртуальну ІВС оцінки температурного профілю ПП. Виконано оцінку ССМП визначення температур ПЗ.

Для складання температурної картини ПП частину температур, що цікавлять, одержують безпосереднім вимірюванням, а частину – непрямым визначенням (рис. 7).

На рис. 7. позначено датчики вимірювання температури: 1 – зовнішньої сторони зведення печі; 2 – активної зони печі; а також частини об'єкту, що контролюються:

3, 4 – зовнішній і внутрішній шар футерування; 5 – об’єкт теплової обробки (заготівка, що нагрівається); 6 – інжекційний газовий пальник; 7 – дно печі.

Непрямими методами визначаються розподіли температур по сиченню: в – зведення; ж – заготівок, що нагріваються. Крім того, непрямими методами визначаються значення величин щільностей потоків теплових втрат – а, а також температур поверхні: е – заготівки, що нагрівається; г – внутрішньої сторони зведення.

Прямими методами визначаються значення температур: б – зовнішньої сторони поверхні зведення; д – газового середовища активної зони печі.

Структурна схема ІВС оцінки температурного профілю ПП, побудованої на базі сертифікованих пристроїв, зображена на рис. 8.

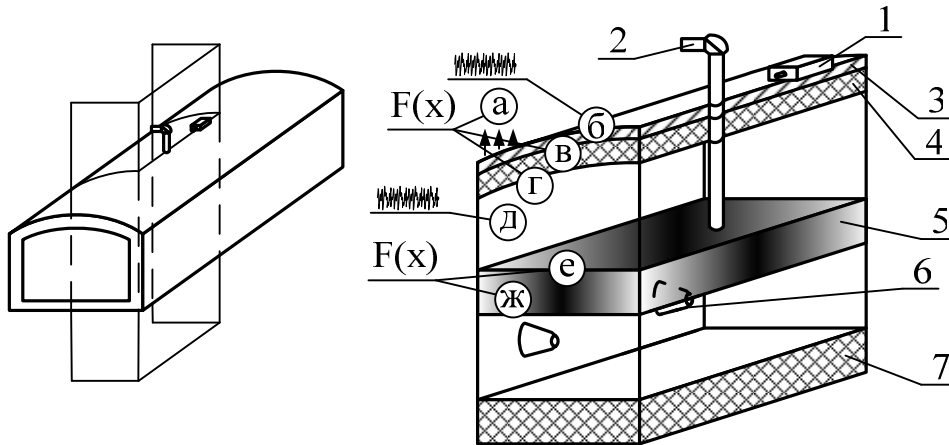


Рисунок 7. Схема встановлення датчиків і принципи визначення температур ПП

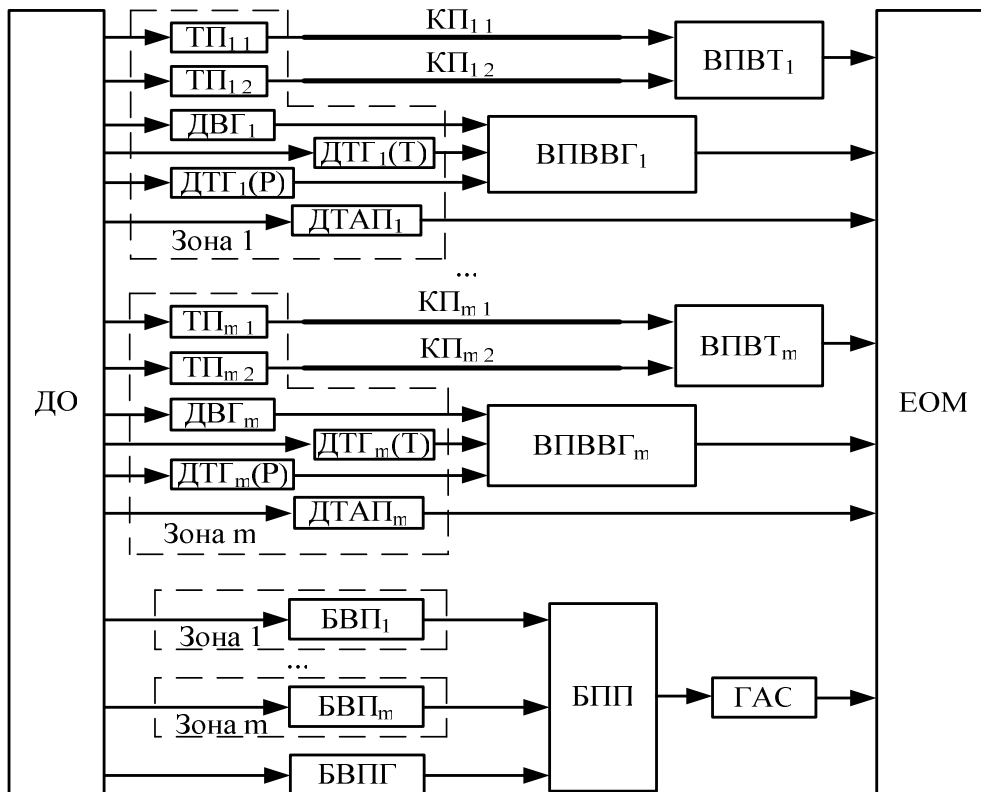


Рисунок 8. Структурна схема ІВС оцінки температур ПП

На рис. 8. зображено: ДО – досліджуваний об’єкт; ЕОМ – промисловий комп’ютер; ТП – датчик вимірювання температури (термопара); КП – компенсацийний провід; ВПВТ – вторинний прилад вимірювання температури; ДВГ – датчик витрати газу; ДТГ(Р) – датчик тиску газу; ДТГ(Т) – датчик температури газу; ВПВВГ – вторинний прилад вимірювання витрати газу; ДТАП – датчик тиску атмосфери печі; БВП – блок відбору проб димових газів; БВПГ – блок відбору проб газу; БПП – блок підготовки проб; ГАС – газоаналітична стойка (газоаналізатор).

Після вибору обладнання, значення абсолютних похибок вимірювальних каналів температури не перевищують величини $\Delta = \pm 5,4^\circ\text{C}$ та $\Delta = \pm 1,05^\circ\text{C}$.

Похибка математичної моделі теплової роботи печі, обумовлена інструментальними похибками засобів вимірювання, не перевищує $\Delta = \pm 7,5^\circ\text{C}$.

В розділі розроблено віртуальну ІВС на базі АСНД LabVIEW (рис. 9).

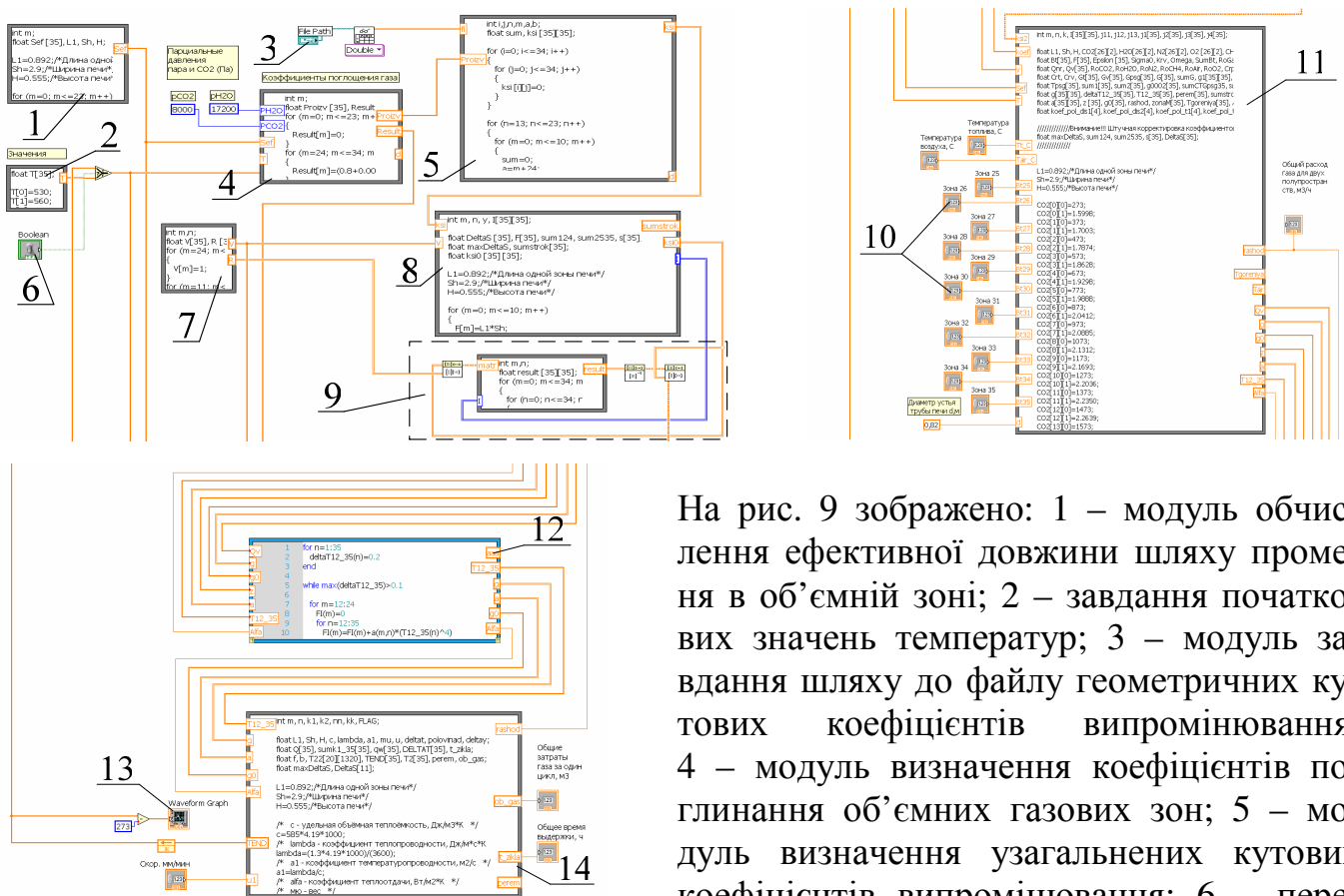


Рисунок 9. Реалізація програми віртуальної ІВС оцінки температур ПП

значень узагальнених кутових коефіцієнтів випромінювання; 9 – блок визначення розв’язувальних узагальнених кутових коефіцієнтів випромінювання; 10 – задавачі кількості палива, що подається до зон; 11 – модуль визначення коефіцієнтів конвективного теплообміну і параметрів процесу горіння; 12 – модуль розв’язання задачі зовнішнього теплообміну; 13 – модуль виводу на екран розподілу температур по зонах та довжині печі; 14 – модуль розв’язання задачі внутрішнього теплообміну.

Блок-схему вихідних параметрів моделі теплових процесів ПП зображено на рис. 10.

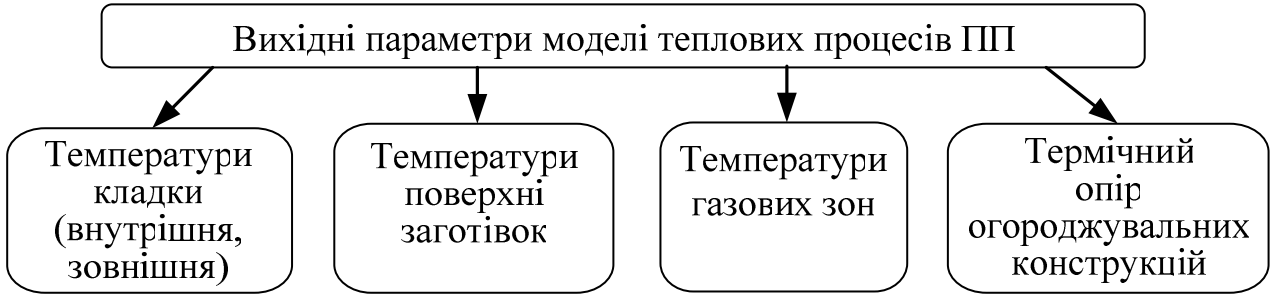


Рисунок 10. Вихідні параметри моделі теплових процесів ПП

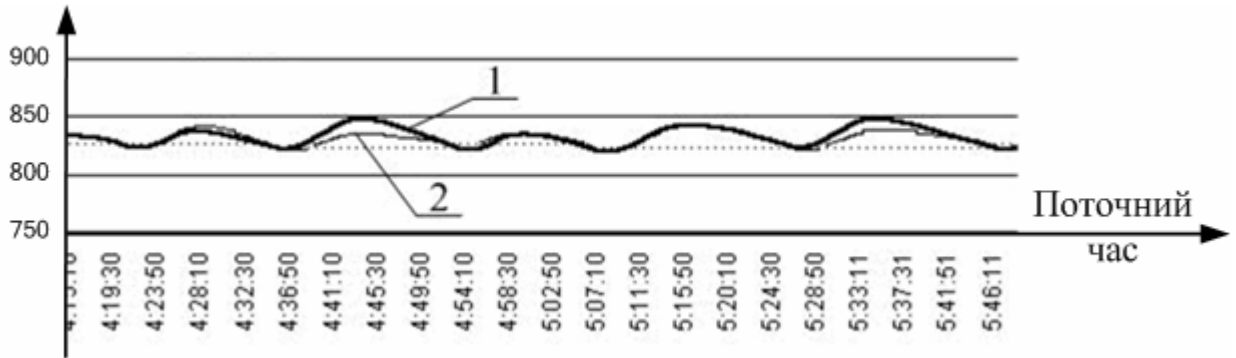


Рисунок 11. Порівняння значень температур в ТТВ, отриманих за допомогою моделі і контактного датчика

На рис. 11. зображено значення температур в ТТВ, які отримано за допомогою: 1 – моделі; 2 – контактного датчика. Максимальна розбіжність між значеннями температур в ТТВ, отриманих за допомогою датчика і моделі, не перевищила 15 °С.

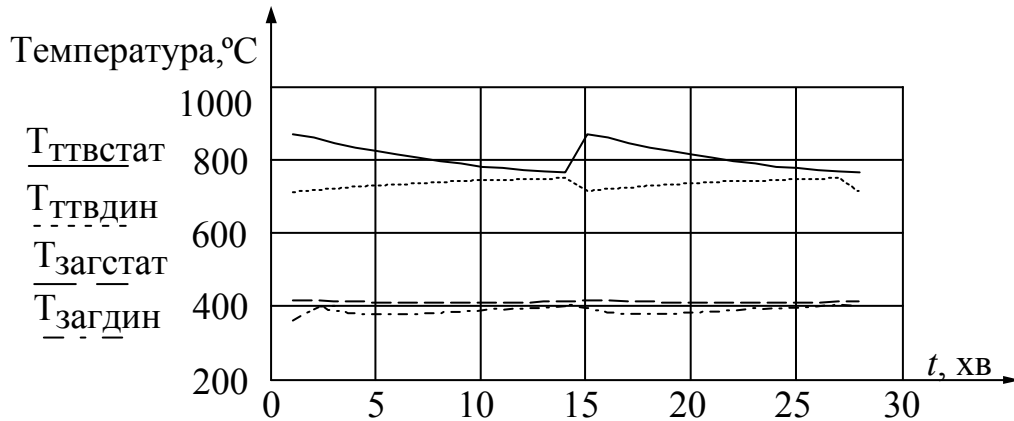


Рисунок 12. Поведінка температур в m+1-й об'ємній зоні при моделюванні відпрацювання регулятором ПД-закону

Поведінку температур в m+1-й об'ємній зоні при моделюванні відпрацювання регулятором ПД-закону регулювання зображено на рис. 12. Тут $T_{ТТВстат}$ і $T_{ТТВдин}$ – температури в ТТВ по статичній і динамічній моделям; $T_{загстат}$ і $T_{загдин}$ – середні температури ПЗ по статичній і динамічній моделям.

Значення ССМП визначення температур ПЗ визначається як $\Delta_{ПЗ} = T_{ТТВМ}(\bar{X}_{ТТВМ}, \bar{B}_{ТТВМ}) - T_{ПЗМ}(\bar{X}_{ПЗМ}, \bar{B}_{ПЗМ})$, де $T_{ТТВМ}$ – температура в ТТВ, отримана за моделлю, $\bar{X}_{ТТВМ}$ – вектор

вхідних змінних моделі температури в ТТВ. $\bar{X}_{ТТВМ} = (x_{mme}, y_{mme}, z_{mme}, D_n, Ш_n, B_n, c, \lambda, d, B_{II}, PH_2O, PCO_2, u)$, де $x_{mme}, y_{mme}, z_{mme}$ – координати місця розташування ТТВ температури; $D_n, Ш_n, B_n$ – геометричні параметри активної зони печі; c та λ – питома об'ємна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу тіл, що нагріваються; d – товщина заготовок, що нагріваються; B_{II} – витрата газу; PH_2O і PCO_2 – парціальні тиски CO_2 і H_2O ; u – швидкість руху заготовок в печі; $\bar{B}_{ТТВМ}$ – вектор параметрів моделі ТТВ; $T_{ПЗМ}$ – температура ПЗ, отримана по моделі; $\bar{X}_{ПЗМ}$ – вектор вхідних змінних моделі температури ПЗ. $\bar{X}_{ПЗМ} = (x_{n3}, y_{n3}, z_{n3}, D_n, Ш_n, B_n, c, \lambda, d, B_{II}, PH_2O, PCO_2, u)$, де x_{n3}, y_{n3}, z_{n3} – координати зони ПЗ; $\bar{B}_{ПЗМ}$ – вектор параметрів моделі ПЗ.

Значення невиключеної складової систематичної похибки визначення температур ПЗ після настання в зоні теплової рівноваги склало: $\Sigma_{ПЗ} = \sqrt{(24 - 21)^2 + 5,4^2 + 7,5^2} = 9,72^\circ C$.

Формула визначення температури ПЗ має вигляд:

$$T_{ПЗ} = T_{ПЗМ}(\bar{X}_{ПЗМ}, \bar{B}_{ПЗМ}) - (T_{ТТВМ}(\bar{X}_{ТТВМ}, \bar{B}_{ТТВМ}) - T_{ТТВДАТ}),$$

де $T_{ТТВДАТ}$ – температура в ТТВ, виміряна за допомогою термометри.

Таким чином, шляхом ідентифікації невизначеності вимірювань температур в ТТВ з наступною корекцією зведена до рівня невиключеного залишку ССМП вимірювання температури ПЗ. При цьому знижка похибки визначення температури ПЗ в зоні попереднього нагріву, для найбільшого значення невизначеності, рівного $40^\circ C$, складе: $\frac{40^\circ C - 9,72^\circ C}{40^\circ C} \cdot 100\% = 75,7\%$.

Розроблена ІВС забезпечує підвищення точності визначення температур ПЗ в зонах попереднього нагріву на $\frac{40^\circ C - 9,72^\circ C}{9,72^\circ C} \cdot 100\% = 311,5\%$ за рахунок використання інформації, яка отримується від сертифікованих вимірювальних пристроїв і розроблених віртуальних моделей теплофізичних процесів ПП.

ВИСНОВОК

В дисертаційній роботі дано нове розв'язання актуальної народно-господарської задачі підвищення точності і розширення функціональних можливостей ІВС оцінки температурного профілю прохідної печі, побудованої на базі моделей теплофізичних процесів з використанням сертифікованих пристроїв, шляхом ідентифікації виду похибок з наступною корекцією результатів контролю і виконання безперервної оцінки технічного стану кладки.

1. В роботі проведено аналіз особливостей, пов'язаних з вимірюванням температур внутрішнього простору ПП та виконано аналіз джерел похибок вимірювання. При цьому, необхідні показники точності вимірювання температур ПЗ, які лежать в межах $\pm 10^\circ C$, забезпечуються лише в зоні заключного нагріву за допомогою пірометрів, а розглянуті способи установки датчиків температури в активній зоні печі не забезпечують необхідної точності вимірювання, оскільки не враховують процеси теплообміну в печі.

2. Розроблено метод ідентифікації невизначеності вимірювань температур в ТТВ на основі встановлення взаємозв'язку між температурами в ТТВ, в газових об'ємах, на

ПЗ і на поверхні кладки з використанням ІВС на базі віртуальних моделей теплофізичних процесів ПП і сертифікованих вимірювальних пристроїв. Використання запропонованого методу для корекції температур ПЗ дозволяє звести до рівня невиключеного залишку ССМП визначення температур, що забезпечує підвищення точності вимірювань до $\pm 10^\circ\text{C}$.

3. Запропоновано метод прискореного отримання геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання між двома об'ємними зонами теплового агрегату, а також між об'ємними і поверхневими зонами, що використовуються при визначенні значень щільностей теплових потоків на ПЗ, що нагріваються. В даному методі, як елементарна одиниця інтеграції, використовується нескінченно тонкий паралелепіпед. Також в роботі отримав подальший розвиток метод отримання коефіцієнтів випромінювання для двох плоских зон. Час оновлення показань системи складає, приблизно, 4 с, при наступних параметрах ЕОМ: процесор Intel Pentium 2 Core 1,86 ГГц, оперативна пам'ять DDR II 2048 Мб. Метод може використовуватися для отримання геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання між поверхневими і об'ємними, а також двома об'ємними зонами, з введенням додаткового поправкового коефіцієнта, залежного від геометричних параметрів активної зони печі.

4. Розроблено метод оцінки технічного стану кладки теплового агрегату в реальному часі, заснований на порівнянні значень потоків теплових втрат, одержуваних у нинішній момент часу, з їх значеннями для справного технічного стану кладки. По ступеню їх відмінності виноситься рішення про початок проведення профілактичних і ремонтних робіт.

5. Розроблено метод визначення температур в ТТВ на базі методу моделювання нагріву циліндричних тіл в активній зоні теплових агрегатів при стаціонарному теплообміні. Результати застосування моделі добре узгоджуються з теоретичними викладеннями. Максимальна розбіжність між значеннями температур в ТТВ, отриманих за допомогою датчика і моделі, не перевищила 15°C .

Система побудована шляхом розв'язання таких задач, як виявлення вузьких місць відомих вимірювальних систем і способів вимірювання і їх виключення методами:

- використання нових автоматизованих технологій, що базуються на основі розробленої структури ІВС, реалізованої у вигляді віртуального приладу в інженерно-обчислювальному комплексі LabVIEW;

- математичного моделювання теплової роботи печі, з урахуванням геометричних параметрів активної зони і подальшою оцінкою розподілу температур ПЗ по довжині печі і значень температур в ТТВ;

- алгоритмічної оцінки і обліку радіаційних характеристик газових об'ємних зон, шляхом визначення їх кутових коефіцієнтів випромінювання;

- підвищення точності визначення температур ПЗ в зоні попереднього нагріву, шляхом оцінки і подальшої корекції ССМП визначення температур;

- оцінки поточного технічного стану кладки і значень потоків теплових втрат, за допомогою сумісного визначення температур зовнішньої і внутрішньої сторін огорожувальних конструкцій теплового агрегату;

- підвищення точності результату вимірювань, ефективності використання засобів обчислювальної техніки, створення методів для проектування приладів і ІВС оцінки температурного профілю прохідних теплових агрегатів.

Результати роботи використовуються в НДР № Н-11-11 (номер державної реєстрації 0111U007025) по темі «Підвищення ефективності електронних приладів і систем» кафедри «Електронна техніка» ДВНЗ ДонНТУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Томилин Е.М. Методология определения температурного состояния проходных печей: монография. / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало. – Донецк : «Ноулидж», 2011. – 223 с.
2. Томилин, Е.М. Система контроля распределения температур по сечению коксового пирога / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало, Н.Г. Винниченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2012. – Вип. 23(201). – С.197-202.
3. Томилин, Е.М. Методика решения систем нелинейных уравнений в режиме реального времени / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало, Е.В. Чернецкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2012. – Вип. 22(200). – С.120-125.
4. Томилин, Е.М. Математическая модель определения угловых коэффициентов излучения объемных и поверхностных зон проходных печей / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2010. – Вип. 18(169). – С.126-132.
5. Чичикало, Н.И. Проектирование блоков формирования законов регулирования для приборов контроля и управления технологическими процессами / Н.И. Чичикало, Н.Г. Винниченко, Е.М. Томилин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2009. – Вип. 17(148). – С.69-77.
6. Томилин, Е.М. Разработка модели идентификации теплового обмена процессов в проходной печи / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Вып. 31, № 1/4: Математика и кибернетика – фундаментальные и прикладные аспекты. – С.59-64.
7. Коломиец, Л.В. Пример реализации структуры управления проходной печью / Л.В. Коломиец, Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Вісн. Інженерної академії України / Інженерна академія України – Київ, 2008. – Вип. 3-4. – С. 90-92
8. Томилин, Е.М. Разработка модели идентификации теплового обмена в проходной печи и его регулирования при помощи SCADA систем / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Вісн. Інженерної академії України / Інженерна академія України – Київ, 2008. – Вип. 2. – С. 149-155
9. Чичикало, Н.И. Способ повышения точности измерения э.д.с. термопар при ненулевом значении температуры холодного спая / Н.И. Чичикало, В.Ю. Ларин, Е.М. Томилин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2006. – Вип. 106. – С.213-219.
10. Томилин, Е.М. Методика контроля технического термодинамического состояния теплового агрегата / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2011): четверта міжнарод. наук.-практ. конф., Київ, 25 трав. 2011: тез. докл. / Національний авіаційний університет. – 2011. – С.222-224.
11. Томилин, Е.М. Методика экспертной оценки технического состояния кладки теплового агрегата / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Інформаційні технології і

сучасність: VIII міжвуз. наук.-практ. конфер. студ. та молодих вчених, Донецьк, 18 трав. 2011: тез. докл. / Європейський. ун-т. – 2011. – С.8-10.

12. Томилин, Е.М. Способ определения температурного профиля проходных пламенных печей и структурной схемы ИИС / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: XI міжнарод. наук.-техніч. конф. аспір. і студ., Донецьк, 17 трав. 2011: тез. докл. / Донец. нац. техн. ун-т. – 2011. – С.228-230.

13. Томилин, Е.М. Система управления процессом измерения параметров горения проходной печи / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // СевергеоэкоТех-2011: XII международ. молодеж. науч. конфер., Донецьк, 16 марта 2011: тез. докл. / Ухтинский. гос. техн. ун-т. – 2011. – С.144-146.

14. Томилин, Е.М. Автоматизированная система диагностики и поддержания температурного профиля проходной печи / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало, Е.Ю. Купцова // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2009): друга міжнарод. наук.-практ. конф., Київ, 25 трав. 2009: тез. докл. / Національний авіаційний університет. – 2009. – С.219-220.

В роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належить: [1] – математична модель температурного профілю досліджуваного теплового агрегату, методика оцінки температур в ТТВ, методика непрямого вимірювання температур, розробка ІВС оцінки температурного профілю ПП; [2] – модель розподілу температур по перерізу коксового пирога; [3] – модель розв'язання системи нелінійних рівнянь в режимі реального часу на базі стандартизованого пристрою; [4] – модель визначення кутових коефіцієнтів випромінювання між об'ємними і поверхневими, а також двома об'ємними зонами ПП; [5] – розробка схеми блоку регулювання, обґрунтування вибору протоколу обміну даними програми з мікропроцесорним пристроєм; [6] – метод отримання кутових коефіцієнтів випромінювання; [7] – схема реалізації приладу і автоматизованої системи управління нагріванням і прожаренням, вибір сертифікованих пристроїв; [8] – отримання кутових коефіцієнтів випромінювання математичної моделі температури в ТТВ, моделювання відробітку ПП закону регулювання SCADA-системою; [9] – спосіб обліку ненульового значення температури холодного кінця спаю термопари; [10] – метод контролю технічного і термодинамічного стану теплового агрегату; [11] – розробка методики експертної оцінки технічного стану кладки печі на базі залежності густини потоків теплових втрат через кладку від температур її стінок; [12] – схема установки датчиків і способів визначення складових температурного профілю ПП, спосіб визначення розподілу температур по перетину зведення і заготівки; [13] – схема системи аналізу і управління процесом вимірювання параметрів горіння в ПП; [14] – схема автоматизованої системи діагностики і підтримки температурного профілю ПП, схема розстановки датчиків.

Вказані публікації повною мірою відображають основний зміст дисертації і її наукові положення, а також відповідають вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України.

АНОТАЦІЯ

Томілін Є.М. Побудова ІВС оцінки температурного профілю прохідних печей на базі віртуальних моделей та сертифікованих пристроїв. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – «Комп'ютерні системи та компоненти» – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної народно-господарчої задачі розробки інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) з розширеними функціональними можливостями та підвищеними показниками точності оцінки температурного профілю прохідних печей (ПП), яка забезпечує підвищення якості технологічних процесів термічної обробки заготовок в ПП.

Розроблено метод підвищення точності визначення температур поверхонь заготовок в зонах попереднього нагріву. Обґрунтовано метод моделювання нагріву циліндричних тіл в технологічних точках вимірювання. Розроблено метод визначення геометричних кутових коефіцієнтів випромінювання для об'ємних і поверхневих зон, а також для двох об'ємних зон. Розроблена структура ІВС, та вибрано сертифіковані вимірювальні пристрої системи. В автоматизованій системі наукових досліджень побудована віртуальна модель розподілу температур в робочому просторі ПП. Здійснено оцінку метрологічних параметрів вимірювальних каналів і похибок моделі. Розроблено метод непрямого вимірювання температур внутрішньої сторони кладки ПП. На його базі розроблено метод оцінки технічного стану кладки ПП.

Ключові слова: технологічна точка вимірювання, інформаційно-вимірювальна система, температурний профіль, методична похибка, прохідна піч, сертифікований пристрій, віртуальна модель.

АННОТАЦІЯ

Томилин Е.М. Построение ИИС оценки температурного профиля проходных печей на базе виртуальных моделей и сертифицированных устройств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Компьютерные системы и компоненты» – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2013.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной народно-хозяйственной задачи разработки информационно-измерительной системы (ИИС) с расширенными функциональными возможностями и повышенными показателями точности оценки температурного профиля проходных печей (ПП), которая обеспечивает повышение качества технологических процессов термической обработки заготовок в ПП.

На основании анализа известных способов определения температур внутреннего пространства ПП и особенностей теплофизических процессов термической обработки, установлены основные источники погрешностей. Разработан метод повышения точности определения температур поверхности заготовок (ПЗ) в зонах предварительного нагрева путем идентификации неопределенности измерений температур в технологической точке измерения (ТТИ) с последующей коррекцией и сведением до уровня неисключенного остатка систематической составляющей методической погрешности.

Теоретически обоснован метод моделирования радиационно-конвективного нагрева цилиндрических тел в местах установки контактных датчиков температуры. Экспериментально инструментальным способом и с помощью автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) подтверждена адекватность разработанного метода определения температур в ТТИ ПП.

Разработан метод определения геометрических угловых коэффициентов излучения для объемных и поверхностных зон, а также для двух объемных зон, которые используются при определении плотностей тепловых потоков на ПЗ для определения распределения температур по их сечению. В его основе лежит формула определения угловых коэффициентов излучения между точечным источником и элементарной площадкой, однако здесь в качестве единицы интегрирования рассматривается элементарный параллелепипед, а границы интеграла берутся по границам объемной зоны. Результаты разработанного метода использованы при дальнейшем развитии методики ускоренного определения геометрических угловых коэффициентов излучения.

Разработана структура ИИС оценки температур внутреннего пространства ПП, с обоснованием набора и последующим выбором сертифицированных измерительных средств.

Построена виртуальная модель распределения температур в газовых зонах, на ПЗ, в кладке свода, в ТТИ по длине ПП. В основе модели лежит зональный метод описания тепловых процессов в ПП, реализованный в современной АСНИ. При этом, входные данные модели определяются при помощи сертифицированных измерительных устройств, передающих информацию по стандартным протоколам обмена данными.

Разработан метод косвенного измерения температур внутренней стороны кладки ПП и определена его область применения для стационарных процессов. Метод основан на одновременном измерении температур наружной стороны поверхности кладки и значений плотностей потоков тепловых потерь через неё, с последующим определением температур на её внутренней поверхности.

На базе описанного выше метода разработан метод оценки технического состояния кладки ПП, который базируется на совместном определении температур внешней и внутренней сторон кладки печи с последующей оценкой превышения допустимых значений тепловых потерь через ограждающие конструкции теплового агрегата, что дает возможность предупреждать возникновение аварийных ситуаций на объекте. Реализация метода предполагает использование значений температур внутренней поверхности кладки, полученных при помощи разработанной ИИС. Значения плотностей потоков тепловых потерь используются для уточнения температур газовых зон и поверхности кладки.

Ключевые слова: технологическая точка измерения, информационно-измерительная система, температурный профиль, методическая погрешность, проходная печь, сертифицированное устройство, виртуальная модель.

ABSTRACT

Tomilin E. Building of a pusher-type furnace temperature profile estimation data-measuring system based on virtual models and certificated devices. – As manuscript.

Thesis for Ph.D. degree in the specialty 05.13.05 – computer systems and components. – Donetsk National Technical University. Donetsk. – 2013.

Thesis covers national-economy task solution of a data-measuring system (DMS) development which has enriched functionality and extended accuracy indices of the pusher type furnace temperature profile estimation. It is provide improving of a billet thermal treatment process quality.

Enhancement method of billets surfaces temperatures determination accuracy in preheating zones was developed. A method of a cylindrical solid heating modeling in TMP was substantiated. Bulk band and surface band and both bulk bands geometrical angular emissivity

coefficient determination method were developed. A DMS structure was developed and system certified measuring means were chosen. Virtual model of a pusher furnace workspace temperature distribution was built in a LabView CAS of scientific researches. Measuring channels metrological parameters and model errors were estimated. A method of a pusher furnace interior brickwork indirect temperatures measurement was developed. Pusher furnace brickwork technical state estimation method was developed based on it.

Keywords: technological measuring point, data-measuring system, temperature profile, truncation error, pusher furnace, certificated device, virtual model.