

М. І. Базалєєв, С. Є. Донець, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, Є. М. Прохоренко (Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків, Україна)

Неруйнівний термографічний контроль стану теплоізоляційних матеріалів електростанцій

В роботі вирішується проблема оцінки стану багатошарових теплоізолюючих конструкцій, в тому числі тих, що містять приховані дефекти. Запропоновано методіку скринінгового тепловізійного обстеження поверхонь теплоізолюючих конструкцій з метою встановлення зон пошкодження. На підставі одержаних даних вимірювань шляхом чисельного розв'язання оберненої задачі встановлюється значення теплофізичних характеристик шарів теплоізолюючих матеріалів.

Ключові слова: Теплова ізоляція, тепловізійний скринінговий контроль, обернена задача теплопровідності

В работе решается проблема оценки состояния многослойных теплоизоляционных конструкции, в том числе содержащих скрытые дефекты. Предложена методика скринингового тепловизионного обследования поверхностей теплоизоляционных конструкций с целью установления зон повреждения. На основании полученных данных измерений путем численного решения обратной задачи устанавливается значение теплофизических характеристик слоев теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: Тепловая изоляция, тепловизионный скрининговый контроль, обратная задача теплопроводности.

This paper solves the problem of estimating the state of multilayer insulating structures, including those containing hidden defects. The method of screening thermovision testing of surfaces of heat-insulating structures with the purpose of establishing zones of damage is proposed. On the basis of the obtained data of measurements by numerical solution of the inverse problem, the value of the thermo-physical characteristics of the layers of the insulating materials is determined.

Key words: thermal isolation, heat imaging screening control, inverse heat conduction problem.

Постановка проблеми в загальному вигляді

Однією зі складових забезпечення подовження ресурсу обладнання та здійснення ранньої діагностики пошкоджень конструкційних і теплоізоляційних матеріалів АЕС та ТЕС є проведення періодичних вимірювань температури на поверхні устаткування та комунікацій. Дотримання встановлених значень температури є важливим також з огляду забезпечення норм техніки безпеки і охорони праці, здійснення контролю за станом матеріалу теплоізоляції, дотриманням заданих режимів тепломасообміну в енергетичній установці. Протяжність трубопроводів електростанцій становить декілька кілометрів, при цьому для кожного типу трубопроводів та обладнання існують допустимі значення температури поверхні, що визначені нормативними документами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Так, згідно [1], температура зовнішньої поверхні теплової ізоляції трубопроводів та обладнання АЕС залежить від багатьох обмежуючих чинників, таких як температура теплоносія, місце розташування обладнання (приміщення чи відкрите повітря), тип зовнішнього захисного матеріалу та ін.

Таким чином, виникає задача оперативного контролю за розподілом значень температури на поверхні технологічного обладнання. На теперішній час дистанційний термографічний неруйнівний контроль є одним з прогресивних методів, що знаходить застосування в різних галузях народного господарства [2,3]. Аналіз термографічних даних зазвичай проводиться з застосуванням стандартного програмних функцій, якими комплектуються тепловізійні прилади. Разом з тим ефективно застосування цього методу до контролю об'єктів з інтенсивними теплообмінними процесами, які властиві для обладнання енергетичних установок, потребує застосування спеціалізованих методик накопичення обробки та інтерпретації даних.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Можливість успішного застосування термографічних методів для контролю за станом теплоізоляційних конструкцій АЕС та ТЕС зумовлена, як технічними характеристиками тепловізійного приладу (температурне та просторове розрізнення, можливість проведення автоматизованої зйомки без присутності оператора, стійкість до впливу зовнішніх чинників), так і адекватністю математичного апарату обробки одержаних термографічних даних. Реалізація термографічного методу неруйнівного контролю стану матеріалів трубопроводів (як теплоізоляційних конструкцій, так і стінок трубопроводів) можлива на основі розв'язання обернених задач теплопровідності. Одним з сучасних підходів до розв'язання задач термографічного контролю є застосування обчислювальних методів на основі нейронних мереж, зокрема, використовуючи процедуру навчання нейронної мережі на модельних виборках [4]. Разом з тим реалізація методу неруйнівного термографічного контролю передбачає попередню побудову імітаційної фізичної моделі об'єкту дослідження, яким є трубопровід з власною товщиною стінки та багатошаровою теплоізоляційною конструкцією. Таким чином, для навчання нейронної мережі необхідно побудувати об'єктовану фізичну модель конструкції з реальними значеннями геометричних розмірів, теплофізичних характеристик та граничних умов.

Виклад основного матеріалу досліджень

Моделі теплообміну в технологічній теплоізоляції

Значення зовнішньої температури теплоізолюючих труб та обладнання, наприклад АЕС, в залежності від призначення та місця розташування визначається нормами, закладеними в документі [1]. Перевищення встановлених значень температури або спостереження локального відхилення від загально фонового значення може бути викликано однією або сукупністю причин, а

саме:

- пошкодження теплоізоляції внаслідок технологічної вібрації або впливу пароповітряної суміші;
- пошкодження покривного шару,
- наявність витоків теплоносія через свищі з утворенням пароповітряної хмари;
- неякісного монтажу теплоізоляції;
- стоншення стінки трубопроводу або утворення на внутрішній поверхні твердого осаду.

Слід брати до уваги, що в процесі пуску, зупинки або переходу на режим роботи з неповним використанням потужності необхідно дотримуватись у встановлених межах швидкостей прогріву та охолодження трубопроводів. Перехідні теплові процеси можуть бути унікальним інструментом здійснення активного теплового контролю трубопроводів оскільки, фактично за допомогою штучних засобів нагріву даний метод контролю реалізувати практично неможливо.

Проведення тепловізійної діагностики стану устаткування та трубопроводів АЕС потребує урахування як процесів, що відбуваються на контактній поверхні теплоносія з обладнанням, так і стану теплоізолюючих конструкцій а також особливостей їх проектування та монтажу. Так, згідно [1] теплова ізоляція об'єктів АЕС повинна забезпечувати: енергоефективність; надійність та довговічність експлуатації теплоізоляційних конструкцій без зниження теплозахисних функцій; вимоги безпеки та захисту довкілля і, що є особливо важливим для розробки методик тепловізійного контролю, можливість систематичного спостереження в процесі експлуатації за елементами ізолюваних об'єктів в місцях вимірювань та перевірки стану поверхонь ізолюваних об'єктів.

Усі поверхні устаткування та трубопроводів, які мають температуру поверхні понад 45 °С, та розташовані в приміщеннях перебування персоналу мають теплову ізоляцію. При температурі теплоносія понад 60 °С теплову ізоляцію мають трубопроводи, що знаходяться в приміщеннях, які не обслуговуються. Отже при розробці методик проведення тепловізійного обстеження необхідно попередньо розробляти теплофізичну модель устаткування з урахуванням вихідних параметрів теплоізолюючих конструкцій. Слід брати до уваги, що поява температурної аномалії на тепловізійному зображенні може бути спричинена як дефектними утвореннями устаткування, так і деградацією теплофізичних властивостей теплоізолюючої конструкції. Причому механізм руйнівного впливу не обов'язково може бути зумовлений втратою властивостей обладнання, наприклад, конденсацією утворенням внаслідок тріщин трубопроводів, або впливом підвищеної температури внаслідок стоншення, хімічним впливом дезактивуючи розчинів тощо. Серед чинників впливу можуть виступати також вібрація. Хоча цей чинник намагаються мінімізувати за рахунок застосування для теплоізоляції віброуючих конструкцій (турбіни, вентилятори, насоси, трубопроводи) прошивних матів на основі базальтового супертонкого волокна в двосторонній обкладці з кремнеземної та скляної тканини, відомо [5], що вказані матеріали так само в процесі експлуатації втрачають теплоізоляційні властивості. Прогнозована оцінка зміни теплофізичних коефіцієнтів при здійсненні тепловізійного моніторингу, в тому числі з застосуванням активуючого зовнішнього впливу дозволить ідентифікувати походження температурних аномалій. В роботі [6] розроблено методику розрахунку зміни теплофізичних властивостей ізоляційних матеріалів під дією зовнішніх чинників. Теплоізоляційний шар розглядався як такий, що містить тверду фазу – волокна та газову – яка заповнює міжволоконний простір. Відповідно механізми передачі тепла полягали в променистому теплообміні, дифузійній передачі та конвективно му теплообміні. Ефективний

коефіцієнт теплопровідності такої ізоляції буде визначатись з виразу [1,5]

$$k = k_{np} + k_k + k_o, \quad (1)$$

де k_{np}, k_k, k_o – променева, конвективна та дифузійна складові коефіцієнту теплопровідності.

Перед складанням технічного завдання на проведення тепловізійного обстеження необхідно виходити з призначення теплоізолюючої конструкції, які за технологічними функціями підрозділяються на такі, що [1]:

- забезпечують заданий тепловий потік через ізолювані поверхні устаткування, трубопроводів;
- забезпечують задану величину тепловтрат теплоносія через поверхні устаткування;
- забезпечують задану кількість конденсату в паропроводах насиченого пару;
- забезпечують задане значення температури на поверхні теплоізоляційної конструкції;
- запобігають накопиченню конденсату з довколишнього повітря на покривний шар ізолюваного об'єкту з температурою теплоносія, нижчою за температуру оточуючого повітря.

Відхилення температурних характеристик на поверхні ізоляції зумовлюється зміною її теплофізичних властивостей внаслідок впливу температури, вібрації, вологості, дезактивуючи розчинів, іонізуючого випромінювання тощо. Для волоконних тепло ізолюючих матеріалів механізм зміни теплофізичних властивостей полягає в зміні щільності розташування волокон через вплив наведених вище чинників. Теплообмін між волокнами шляхом випромінювання враховується коефіцієнтом [5]

$$k_{np} \sim \sigma T^4 \frac{d}{C_T} (\varepsilon + R_d + 3R_s)^{-1}, \quad (2)$$

де σ - стала Стефана-Больцмана;

R_d, R_s - дифузійний та дзеркальний коефіцієнти відбиття;

d - діаметр волокна;

C_T - концентрація твердої речовини в одиниці об'єму;

T - температура;

ε - ступінь чорноти волокна.

Теплообмін через газову складову речовини ізоляції оцінюється через конвективну складову коефіцієнту теплопровідності [7]

$$k_k \sim k^f (1 - C_T) + C_T (1 - C_T) \frac{61}{32d} - \frac{a}{2d} \mu \sqrt{\frac{\pi}{2} R_T T}, \quad (3)$$

де a - коефіцієнт акомодатії газу на поверхні волокна;

μ - динамічна в'язкість газу;

R_T - газова стала;

k^f - коефіцієнт теплопровідності газу-наповнювача.

Внесок коефіцієнту дифузійної складової визначається з виразу [6]

$$k_o = 0,5k_b C_T \left(1 - \frac{1}{\frac{shM}{N} + chM} \right), \quad (4)$$

де k_b - коефіцієнт теплопровідності волокна;

$$M = 2^{0,25} \sqrt{\frac{\pi \alpha d}{k_b C_T}};$$

$$N = 24,65\pi \sqrt{\frac{d \alpha}{k_b}};$$

α - сумарний коефіцієнт тепловіддачі,

$$\alpha = \frac{\alpha_c \alpha'_k}{\alpha_c + \alpha'_k} + \alpha_n$$

де $\alpha_c = 0,267 \frac{c_v}{R_T} pa \sqrt{\frac{R_T}{T}}$ - коефіцієнт тепловіддачі

для розрідженого газу; $\alpha'_k = \frac{2k^\Gamma}{d \ln(\sqrt{C_T})^{-1}}$ - коефіцієнт

теповіддачі для щільного газу; $\alpha_n = 4\varepsilon\sigma T^4$ - коефіцієнт

теповіддачі випроміненням.

Геометричні розміри тепло ізолюючої конструкції обладнання АЕС визначаються виходячи з її функціонального призначення [1,5], а саме:

- за нормованої густини теплового потоку через поверхню тепло ізолюючої конструкції, значення якої в залежності від діаметру трубопроводу та температури теплоносія становить від до 8 до 1756 Вт/м²;
- за заданою величиною теплового потоку;
- за заданим значенням зміни температури теплоносія;
- за температурою на поверхні теплоізолюючої конструкції;

Товщина теплоізолюючого шару d для плоских поверхонь та циліндричних об'єктів діаметром 2 м і більше визначається за формулою [1]

$$d = k(K_{on}R - (1/\alpha) - R_{nm}), \quad (5)$$

де k - теплопровідність тепло ізолюючого шару Вт/(м К);

K_{on} - коефіцієнт урахування потоку теплоти через технологічні опори (в залежності від діаметру трубопроводу має значення від 1, 2 до 2);

α - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції Вт/(м²К) (для покривних матеріалів з алюмінію, тонколистової сталі, алюмінієвих сплавів дорівнює 6, для покривного шару з склопластиків а також матеріалів на основі синтетичних та природних полімерів, асбестоцементних листів дорівнює 11);

$R_{nm} = d/k$ - додатковий термічний опір неметалічної стінки ізолюваного об'єкту;

R - опір теплопередачі теплоізоляційної конструкції (м²К/Вт) Ця величина визначається в залежності від технологічних функцій теплоізоляції. Так для теплоізоляції, спроектованої за нормованою поверхневою густиною теплового потоку

$$R = (t_{mn} - t_n) / q, \quad (6)$$

де t_{mn} - температура теплоносія °С;

t_n - температура навколишнього середовища °С;

q - розрахункова поверхнева густина теплового потоку через поверхню теплоізоляційної конструкції, Вт/м² (визначається за табличними даними документу [1]).

Для теплоізоляції спроектованої по заданій величині теплового потоку

$$R = ((t_{mn} - t_n)SK_{on}) / Q, \quad (7)$$

де S - площа тепловиділяючої поверхні,

Q - заданий тепловий потік через теплоізолюючу конструкцію.

Для теплоізоляції, спроектованої виходячи з заданого зниження температури теплоносія є доцільним використовувати величину погонного опору теплопередачі

теплоізоляційної конструкції (м К/Вт)

$$r = (3,6 \cdot L \cdot K_{on}) / P \cdot c \cdot \ln(t_{mn1} - t_n / t_{mn2} - t_n), \quad (8)$$

де P - кількість речовини, що проходить ділянкою трубопроводу кг/год;

t_{mn1} - початкова температура теплоносія;

t_{mn2} - кінцева температура теплоносія;

c - питома теплоємність стінки трубопроводу.

Для трубопроводів діаметром менше 2 м товщина теплоізоляційного шару визначається з виразу [1]

$$d = (D/2)(B-1), \quad (9)$$

де $\ln B = 2\pi k K_{on} \cdot r_{mi} - (1/\alpha \cdot \pi \cdot (d+0,1))$;

$B = D_i / D$ - відношення зовнішнього діаметру ізоляційного шару до зовнішнього діаметру трубопроводу;

r_{mi} - опір теплопередачі на 1 м теплоізолюючої конструкції.

Для проведення тепловізійної діагностики відповідності теплоізоляційних конструкцій їх функціональному призначенню необхідно використовувати програмно апаратні функції, які закладені в сучасних приладах. Зокрема, функцію визначення температурного профілю, функцію поверхневого розподілу температури, функція побудови гістограми теплового випромінювання поверхні та ін. Розробка активних методів термографії передбачає можливість використання, як чинника збурення теплового поля, контрольованих коливань температури теплоносія, що можна робити, наприклад вимірюючи температуру поверхні імпульсних трубних проводок контрольно-вимірювальних приладів та систем автоматичного контролю, на які теплоізоляція не встановлюється

Побудова математичної моделі діагностики теплофізичних характеристик

Розширення спектра практичного застосування тепловізійних методів, безпосередньо пов'язано з розвитком ефективних обчислювальних алгоритмів для розв'язування нелінійних багатопараметричних обернених задач, в яких цілий ряд невідомих характеристик визначається за даними одного нестационарного експерименту. Цей тип алгоритмів може забезпечити максимальне отримання інформації з теплофізичних експериментів.

Математично обернена задача належить до більш загального класу варіаційних задач. Однією з найпростіших задач для параболічного типу рівнянь є одновимірною задачею. Розглянемо одновимірний процес теплообміну, який описується математичною моделлю у вигляді крайової задачі для рівняння теплопровідності у циліндричних координатах

$$\rho(r)c_p(r) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot k(r) \frac{\partial T}{\partial r}) = 0, \quad (10)$$

де $T = f(r, t)$ - функція, що описує розподіл температури в товщі багатшарового огороження (тобто в області $\Omega \times [0, t_e]$, $\Omega = \{r | R_{tube} \leq r \leq R_{ins}\}$, $0 \leq t \leq t_e$);

$k(r)$ - теплопровідність матеріалу;

$\rho(x)$ - питома щільність матеріалу;

$c_p(x)$ - ізобарна теплоємність;

t_e - час закінчення розгляду процесу.

Доповнимо (10) граничними умовами на зовнішніх границях:

$$\begin{aligned} T(r, t) \Big|_{r=R_{tube}} &= f_1(t), \\ -k(R) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{ins}} &= h \cdot (T(r, t) \Big|_{r=R_{ins}} - T_{amb}) \end{aligned}, \quad (11)$$

де h - коефіцієнт конвективної тепловіддачі;
 $f_1(t)$ - відома температура на правій границі (температура теплоносія);
 T_{amb} - температура оточуючого повітря.
 Також доповнимо (10) початковою умовою:

$$T(r, t) \Big|_{t=0} = f_2(r), \quad (12)$$

де $f_2(r)$ - початковий розподіл температури в матеріалі.
 Коефіцієнт конвективного теплообміну для зведеної конвекції, в першому наближенні, будемо розраховувати як для вертикальної стіни наступним чином:

$$h = \frac{Nu \cdot k_a}{l},$$

де $Nu = 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}}$ - число Нуссельта;

$Ra = Gr \cdot Pr$ - число Рейля;

$Gr = \frac{2 \cdot l^3 \cdot g \cdot |T_{amb} - T_s|}{\nu^2 (T_{amb} + T_s)}$ - число Грасгофа;

Pr - число Прандтля;

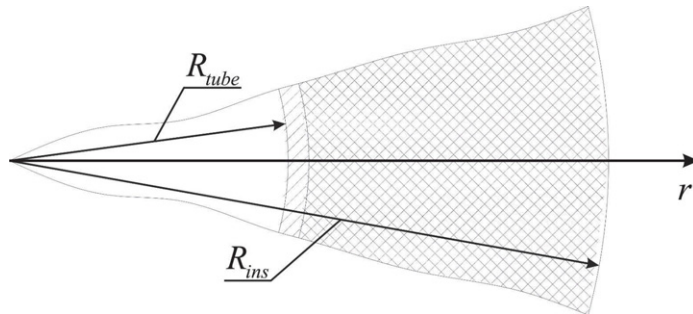


Рис. 1. Геометрія вихідної області

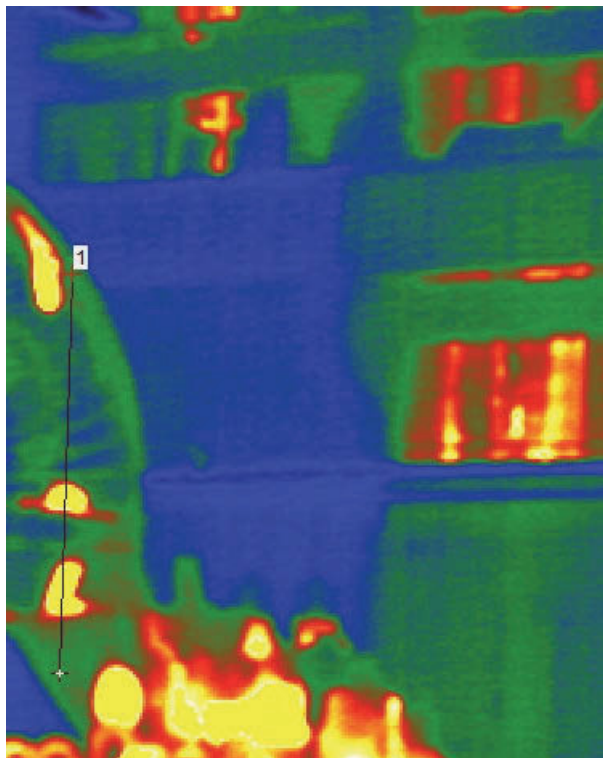
g - прискорення вільного падіння;
 ν - кінематична в'язкість повітря;
 $l = 2 \cdot R_{ins}$ - висота вертикальної стіни;
 k_a - теплопровідність повітря;
 T_s - температура поверхні стіни.

Для вирішення прямої задачі приймаємо геометрію, наведену на рис 1, та використано метод скінчених елементів [9,10].

Для оберненої задачі невідомими величинами є $k(r)$ та $\rho c_p(r) = \rho(r) \cdot c_p(r)$ і метою її розв'язання є їх ідентифікація. Будемо вважати що нам відома температура на зовнішній поверхні, що отримана термографічним методом:

$$T_{exp}(R_{ins}, t) = f_3(t).$$

Для визначення коефіцієнтів вся товщина стінки розбивається на деяку кількість підінтервалів, на яких значення невідомих приймаються постійними і розраховуються для центральної точки підінтервалу. А з усієї безперервної функції температури (яка залежить від часу) на границі області вибираються деякі дискретні значення. Виміряна температура може містити випадкові похибки, але інші величини, що з'являються у фор-



а)



б)

Рис. 2. Термографічне (а) та відео (б) зображення фрагменту технологічного обладнання теплової електростанції

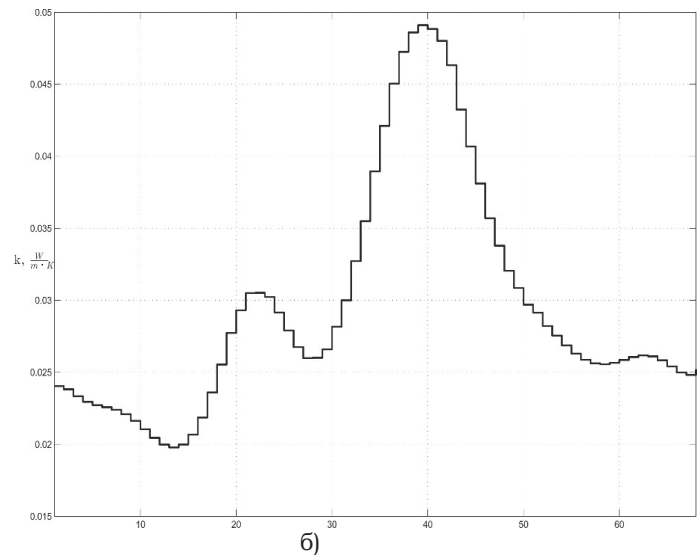
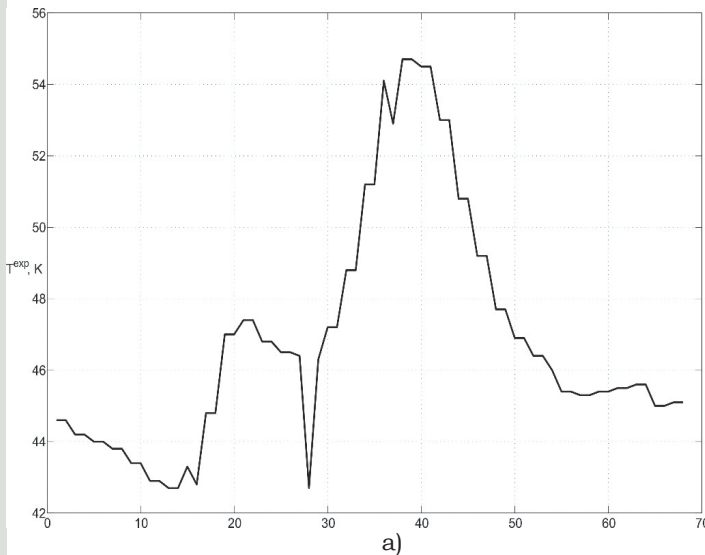


Рис.3. Вимірний розподіл температури (а) та обчислений розподіл узагальненого коефіцієнту теплопровідності (б)

мулюванні прямої задачі, передбачаються точно визначеними.

Для наближеного розв'язання оберненої задачі можна використовувати варіаційне формулювання, в якому необхідно знайти мінімум функціонала нев'язки, який має наступний вигляд:

$$J(k(r), \rho_{c_p}(r)) = \sum_{i=1}^N \int_0^{t_c} (T_{exp}(R_{ins}, \tau) - T(R_{ins}, \tau))^2 d\tau, \quad (13)$$

значення температури на границі конструкції в кожен момент часу розраховані для (10) - (12) при деяких значеннях $k(r)$ і $\rho_{c_p}(r)$.

Для розв'язання оберненої задачі була застосована тришарова нейронна мережа, оскільки багатшаровий перцептрон дозволяє природним чином вирішити варіаційну задачу, що приводить до оптимізації деякого функціоналу [9], з N входів і кількістю виходів, яка визначається подвоєною кількістю підінтервалів, на яку розбивалася товща конструкції [10]. Окрім того навчання нейронної мережі дозволяє не розраховувати кожен раз обернену задачу, а використовувати для вже досліджених геометрій навчену мережу.

Виникає задача визначення особливостей просторового розподілу теплофізичних характеристик за даними одного термографічного знімка. Для цього вихідними даними повинні бути діаметр покривного шару трубопроводу, розміри труби та температура робочої речовини. В залежності від кількості теплоізолюючих шарів, згідно з проектними даними, визначаються їх теплопровідності при розв'язанні зворотної задачі.

Термографічне зображення фрагменту трубопроводу технологічного обладнання теплової електростанції наведено на рис. 2. Як видно, суцільна частина паропроводу в місцях гину та кріплення містить певні дефекти теплоізоляції

Вимірний розподіл температури вздовж ліній (1) на рис. 2. наведено на рис.3 (а). За наведеними даними були визначені теплофізичні характеристики ізоляції трубопроводу за допомогою навченої нейронної мережі рис. 3 (б).

Висновки

Представлена технологія відновлення невідомих теплофізичних характеристик матеріалу дозволяє застосувати її при неруйнівному контролі, оскільки, на ві-

дміну від класичних методик розв'язання обернених задач, немає необхідності у визначенні температур всередині матеріалу. При цьому так само відсутня необхідність у спостереженні перехідного режиму до встановлення сталого стану для визначення щільності, теплопровідності, теплоємності матеріалів. У випадку статичного режиму можна визначати теплопровідність за допомогою навченої нейронної мережі.

Список літератури:

1. *Нормы проектирования тепловой изоляции оборудования и трубопроводов атомных станций РД ЭО0586-2004.*
2. М.І.Базалеев, В.В.Брюховецький, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко, Є.М.Прохоренко / *Термографічний контроль структурних неоднорідностей у феромагнетиках при активації електромагнітним полем // Компресорное и энергетическое машиностроение.-№ 3(37).-2014 с.13-17*
3. Н.И.Базалеев, Б.Б.Бандурян, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко, Г.В.Кирик, А.Д.Стадник / *Тепловизионная дефектоскопия и диагностика компресорного оборудования // Компресорное и энергетическое машиностроение.-2010.-№2(20).-с.37-43*
4. R. Heriansyan, S.A.R. Abu-Bakar / *Simulating and estimating spalling defect depth in passive thermography using neural network techniques// IJSSST.-Vol.9.-N2.-2008.-p.23-30.*
5. Скобелкина Т.Н. *Моделирование и диагностика теплофизических характеристик быстроръемной теплоизоляции многоэтажного использования для атомных станций с реактором ВВЭР// автореф. дисс. канд. техн. наук.-Москва.-2007*
6. *Коеффициент теплопроводности быстроръемной изоляции/ Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Харитонов В.С. // Атомная энергия .- т.99.-вып.3.-2005.-с.236-238*
7. R.A. Khachfe, Y. Jarny / *Numerical solution of 2-d nonlinear inverse heat conduction problems using finite element techniques // Numer. Heat Transfer: Part B: Fundam. – Vol.37. – N1. – 2000. – p. 45-67.*
8. J.N. Reddy *An introduction to nonlinear finite element analysis. – Oxford University press. – 2004. – 463 p.*
9. R. Brent *Algorithms for minimization without derivatives. – Prentice-Hall. – 1973. – 273 p.*
10. T. Masters *Practical neural network recipes in C++. – Academic press inc. – 1993. – 493 p.*