

Ю. А. Селіхов, к. техн. н., професор, К. О. Горбунов, к. техн. н., професор,
Г. В. Пономаренко, к. техн. н., доцент, Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант,
В. Г. Рись, аспірант

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЕРХНІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: термічна взаємодія, високотемпературна поверхня, граничні умови теплообміну, достовірність результатів, метод фізичного моделювання, коректність розв'язання задачі, метод експериментального визначення локальних умов теплообміну, ідентифікація граничних умов теплообміну, зворотне завдання теплопровідності.

Постановка задачі. Відповідно до сучасного стану наукових відомостей про процес термічної взаємодії розпиленої рідини з високотемпературною поверхнею [1, 2], єдино можливим в даний час методом визначення граничних умов теплообміну, що забезпечує достовірність результатів, є метод фізичного моделювання. Тому коректність вирішення завдань, поставлених та сформульованих визначається обґрунтованістю вибору методу експериментального визначення локальних умов теплообміну. Аналіз можливих варіантів вирішення дозволив зробити вибір на користь методу ідентифікації граничних умов теплообміну шляхом вирішення оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ) [3].

Як відомо [4–6] найдостовірніші результати при вирішенні ОЗТ можна отримати при одномірному температурному полі. Тому для дослідження теплообміну необхідно сконструювати і виготовити спеціальний термозонд з матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності, бічна поверхня і один торець якого теплоізовані, а охолодження здійснюється з поверхні другого торця (цю поверхню називатимемо робочою) [6].

Очевидно, що правомірність припущення про одномірність температурного поля визначається не лише значенням коефіцієнта теплопровідності матеріалу термозонда та низькою інтенсивністю теплообміну на його бічній поверхні, а й ступенем зміни густини зрошення в межах робочої поверхні термозонда. Додатковою вимогою до форми термозонда та форми елементів, що входять до конструкції вимірювального блоку, повинна бути їх гранична простота. Виконання цієї вимоги дозволить не тільки забезпечити більш точне рішення ОЗТ, але і більш точно оцінити розрахунковим шляхом можливі похибки у визначенні граничних умов, що шукаються, викликані відхиленням реальних особливостей теплообміну елементів конструкції термозонда від передбачуваних при розрахунковому відновленні коефіцієнтів тепловіддачі або щільності теплового потоку.

Попередні розрахунки показали, що за коефіцієнтів тепловіддачі 32 кВт/(м²с), швидкість зниження температури поверхні, що охолоджується розпиленою рідиною, може перевищувати 100 градусів за секунду. У зв'язку з цим, крім необхідності засто-

сування малоінерційних датчиків температури, виникає необхідність використання сучасної швидкодіючої апаратури для вимірювання термоЕРС. Представлені міркування є опорними даними як для розробки конструкції термозонда і виборі вторинної вимірювальної апаратури, так і для формування методики проведення дослідів і обробці їх результатів.

Мета статті. Розробити методику проведення дослідів та опрацювання їх результатів. Якщо ми візьмемо діаметр стрижня тепломіра 30 мм, коефіцієнт теплопровідності міді порядку 360 Вт/(мК) та інтенсивності теплообміну на бічній, ізольованій його поверхні, що не перевищує 10 Вт/(м²К), критерій Ві становить менше 10⁻³. Як відомо [7, 8], така оцінка є достатньою основою для того, щоб температурне поле стрижня тепломіра можна вважати одновимірним. Відповідно до цього, процес теплопровідності стрижня термозонда описується системою рівнянь [7]:

$$C_v(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$t(x_1, \tau) = \varphi(\tau), \quad (4)$$

де $\varphi(\tau)$ – виміряне значення температури в точці з координатою x_1 .

Розподіл температури в стрижні наприкінці процесу його нагрівання і після деякої витримки стає рівномірним, тобто мідь має високу теплопровідність. Надалі при обчисленні температурних полів початкове розподілення температури приймається рівномірним:

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const.} \quad (5)$$

Теплоємність та коефіцієнт теплопровідності матеріалу стрижня приймаються за довідковими даними [9, 10]:

$$C_v(t) = 3,45 \cdot 10^6 + 720 \cdot t; \quad (6)$$

$$\lambda(t) = 387 - 0,056 \cdot t. \quad (7)$$

Як зазначалося вище, величина теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на робочому торці стрижня термозонда при охолодженні його рідиною будуть визначатися в результаті рішення ОЗТ. Це рішення виконуватиметься прямим методом, яке реалі-

зація здійснюватиметься чисельним способом. Застосування прямого методу рішення ЗЗТ, коли експериментально знайдена зміна температури в часі в окремій точці зразка безпосередньо використовується у вихідних рівняннях математичної моделі або в їх рішеннях, передбачає ретельну обробку первинних даних з метою усунення випадкових помилок вимірів та дешифрування. Згладжування результатів спостережень повинно проводитися методом найменших квадратів та методом кусочно-поліноміальної апроксимації [9].

Визначення температурного поля стрижня повинно виконуватися чисельним способом за явною кінцевою схемою. Ця схема була обрана тому, що умови теплообміну при охолодженні високотемпературної поверхні дисперговою водою змінюються дуже значно через швидкий перехід від одного режиму кипіння води до іншого і для того, щоб у рішеннях відобразити ці зміни доводиться брати малі тимчасові кроки. В цих умовах зручним є саме явний звичайно різницевий метод розрахунку [11, 12]. При цьому температура у внутрішніх точках стрижня визначається співвідношенням, отриманим (1):

$$t_i^{k+1} = t_i^k \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot Fo_i}{\delta_i}\right) + t_{i-1}^k \cdot \frac{2 \cdot Fo_i}{1 + \delta_i} \left(\delta_i + \frac{2 \cdot j_i}{1 + \delta_i}\right) + t_{i+1}^k \cdot \frac{2 \cdot Fo_i}{1 + \delta_i} \left(1 - \frac{2 \cdot j_i}{1 + \delta_i}\right), \quad (8)$$

де $Fo_i = \lambda_i \cdot \Delta\tau / C_{Vi} \cdot h_i^2 \leq 0,5 \cdot \delta_i$; h_i – крок за координатою,

$$j_i = (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}) / 4 \cdot \lambda_i; \delta = h_{i+1} / h_i; i = 1, 2, 3 \dots N-2.$$

У вузол сітки $N-1$ вміщено точку вимірювання температури.

При малих просторових кроках інтегрування вплив параметру j для стрижнів з міді дуже мало і його значення може бути прийнято рівним нулю. Температура на ізолюваному торці стрижня визначається за умов відсутності теплообміну на цій поверхні. Маючи на увазі (3) і, використовуючи просторову похідну у другому наближенні [13, 14], отримаємо:

$$t_0^{k+1} = (t_1^{k+1} + t_0^k / 2 \cdot Fo_1) / (1 + 1/2 \cdot Fo_1). \quad (9)$$

Температура на робочій поверхні стрижня термозонда у точці N визначається шляхом перерахунку. Рівняння (8) для точки $N-1$ у момент часу $k+2$ за умови, що сітка рівнокрокова, запишеться у вигляді:

$$t_{N-1}^{k+2} = t_{N-1}^{k+1} \cdot (1 - 2 \cdot Fo_{N-1}) + Fo_{N-1} \cdot (t_N^{k+1} + t_{N-2}^{k+1}), \quad (10)$$

звідки

$$t_N^{k+1} = t_{N-1}^{k+2} \cdot \frac{1}{Fo_{N-1}} - t_{N-1}^{k+1} \cdot \left(\frac{1}{Fo_{N-1}} - 2\right) - t_{N-2}^{k+1}. \quad (11)$$

Визначення теплового потоку за відомим температурним полем, обчисленим за тією чи іншою схемою, зводиться до отримання похідної від температури за координатою для точок, що лежать на торцевій поверхні стрижня термозонда. Похідна за координатою, апроксимована кінцевими різницями з похибкою другого порядку, визначається наступним виразом:

$$\left(t_N^k\right)' = -\left[t_{n-1}^k - t_N^k + \left(t_N^{k-1} - t_N^k\right) / 2 \cdot Fo_N\right] / h_N. \quad (12)$$

За виконання розрахунків вираз (12) має бути перевірено формулою чисельного диференціювання, заснованої на багаточлені Лагранжа [15 – 17]. Порівняння похідних, обчислених за обома схемами, покаже, що їх значення відрізняються один від одного не більше ніж 1-2%.

Значення теплових потоків та коефіцієнтів тепловіддачі на робочій поверхні стрижня термозонда для процесу охолодження повинні визначатися за відомими співвідношеннями:

$$q_N^k = -\lambda_N \cdot \left(t_N^k\right)', \quad (13)$$

$$\alpha_k = q_N^k / \left(t_N^k - t_c\right), \quad (14)$$

де t_c – температура охолоджувальної рідини.

Висновок. Розроблено математичну модель визначення температурного поля стрижня термозонда. Величина теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на робочому торці стрижня термозонда при охолодженні його рідиною визначатиметься в результаті рішення ОЗТ. Саме рішення виконуватиметься прямим методом, яке реалізація здійснюватиметься чисельним способом.

Література

1. Селіхов Ю.А., Рищенко І.М., Горбунов К.О., Нагорний Е.Р. Інтеграція теплообміну високотемпературної поверхні // Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЕ». – 2024.– №3. С. 3–11.
2. Селіхов Ю.А., Горбунов К.О., Школьнікова Т.В., Пільник І.В. Методика експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну // Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЕ». – 2024.– №3. С. 12–19.
3. Селіхов Ю.А., Миронов А.М., Горбунов К.О., Рись В.Г. Експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну // Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЕ». – 2024.– №3. С. 43–51.
4. Темкин А.Г. Обратные методы теплопроводности. – М.: Энергия, 1973.– 464 с.
5. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. – С.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
6. Мацевитый Ю.М., Мултановский А.В. Идентификация в задачах теплопроводности. – Киев: Наукова думка, 1982. – 249 с.

7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.-Л.: ГИГТЛ, 1952. – 599 с.
8. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976, т. 2. – 896 с.
9. Березин В.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: Физматгиз, 1962, т. 1. – 464 с.
10. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. – Киев: Наукова думка, 1982. – 360 с.
11. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 346 с.
12. Зенкевич О.Н. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 420 с.
13. Обэн Ж.П. Приближенное решение эллиптических краевых задач. – М.: Мир, 1977. – 320 с.
14. Розин Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости. Л.: Изд-во ЛПИ, 1972. – 264 с.
15. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. – М.: Судостроение, 1974. – 286 с.
16. Кабанихин, С.И. Обратные и некорректные задачи / С.И. Кабанихин. – Новосибирск : Сиб. науч. изд-во, 2009. – 458 с.
17. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности : учеб. пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. – 172 с.

Bibliography (transliterated)

1. Selihov Yu.A., Rischenko I.M., Gorbunov K.O., Nagorniy E.R. Integratsiya teploobminu visokotemperaturnoyi poverhni // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya «ІТЕ». – 2024.– #3. P. 3–11.
2. Selihov Yu.A., Gorbunov K.O., Shkolnikova T.V., Pilnik I.V. Metodika eksperimentalnogo doslidzhennya lokalnih umov nestatsionarnogo teploobminu // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya «ІТЕ». – 2024.– #3. P. 12–19.
3. Selihov Yu.A., Mironov A.M., Gorbunov K.O., Ris V.G. Eksperimentalniy stand dlya doslidzhennya lokalnih umov nestatsionarnogo teploobminu // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya «ІТЕ». – 2024.– #3. P. 43–51.
4. Temkin A.G. Obratnyie metodyi teploprovodnosti. – М.: Energiya, 1973.– 464 p.
5. Alifanov O.M. Identifikatsiya protsessov teploobmena letatelnyih apparatov. – S.: Mashinostroenie, 1979. – 216 p.
6. Matsevityiy Yu.M., Multanovskiy A.V. Identifikatsiya v zadachahteploprovodnosti. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 249 p.
7. Lyikov A.V. Teoriya teploprovodnosti. – М.-L.: GIGTL, 1952. – 599 p.
8. Teplotekhnicheskiiy spravochnik / Pod red. V.N. Yureneva i P.D. Lebedeva. – М.: Energiya, 1976, t. 2. – 896 p.
9. Berezin V.S., Zhidkov N.P. Metodyi vyichisleniy.– М.: Fizmatgiz, 1962, t. 1.– 464 p.
10. Kozdoba L.A., Krukovskiy P.G. Metodyi resheniya obratnyih zadach teploperenosu. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 360 p.

11. Streng G., Fiks Dzh. Teoriya metoda konechnykh elementov. – М.: Mir, 1977. – 346 p.
12. Zenkevich O.N. Metod konechnykh elementov v tehnikе.– М.: Mir, 1975.– 420 p.
13. Oben Zh.P. Priblizhennoe reshenie ellipticheskikh kraevykh zadach. –М.: Mir, 1977. – 320 p.
14. Rozin L.A. Osnovy metoda konechnykh elementov v teorii uprugosti. L.: Izd-vo LPI, 1972. – 264 p.
15. Postnov V.A., Harhurim I.Ya. Metod konechnykh elementov v raschetakh sudovyykh konstruktsiy. – М.: Sudostroenie, 1974. – 286 p.
16. Kabanihin, S.I. Obratnyie i nekorrektnyye zadachi / S.I. Kabanihin. – Novosibirsk : Sib. nauch. izd-vo, 2009. – 458 p.
17. Kuznetsov, G.V. Raznostnyie metodyi resheniya zadach teploprovodnosti : ucheb. posobie / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet.– Tomsk : Izd-vo Tomsk. politehn. in-ta, 2007.– 172 p.

УДК 621.016

Ю. А. Селіхов, к. техн. н., професор, К. О. Горбунов, к. техн. н., професор,
Г. В. Пономаренко, к. техн. н., доцент, Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант,
В. Г. Рись, аспірант

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЕРХНІ

Рішення обернених задач теплопровідності для ідентифікації параметрів математичних моделей має особливе значення для забезпечення адекватності цих моделей за наявності експериментальної інформації про досліджуваний тепловий процес. Ефективність прийнятих рішень під час проектування різного енергетичного устаткування залежить як від глибини та достовірності знань явищ теплообміну, так і від адекватності моделювання різних теплофізичних процесів. З метою створення ефективних методів діагностики та ідентифікації таких процесів проводяться експериментальні дослідження та опрацювання їх результатів. В основу цих методів можуть бути покладені рішення обернених задач теплопровідності як для однорідних, так і для композитних середовищ. У даній роботі представлена математична модель визначення температурного поля спеціально розробленого стрижня термозонда та методика вирішення граничної оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ), яка зводиться до визначення теплових потоків та коефіцієнтів тепловіддачі за даними експериментальних вимірювань температур в одній або кількох внутрішніх точках. Величина теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на робочому торці стрижня термозонда при охолодженні його рідиною визначатиметься в результаті рішення ОЗТ. Саме рішення виконуватиметься прямим методом, а його реалізація здійснюватиметься чисельним способом.

Ключові слова: термічна взаємодія, високотемпературна поверхня, граничні умови теплообміну, достовірність результатів, метод фізичного моделювання, коректність розв'язання задачі, метод експериментального визначення локальних умов теплообміну, ідентифікація граничних умов теплообміну, зворотне завдання теплопровідності.

Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov, G. V. Ponomarenko, E. R. Nagorniy, I. V. Pilnyk,
V. G. Ris

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER CONDITIONS WHEN COOLING A HIGH-TEMPERATURE SURFACE

The solution of inverse heat conduction problems for the identification of parameters of mathematical models is of particular importance for ensuring the adequacy of these models in the presence of experimental information about the thermal process under study. The effectiveness of decisions made when designing various power equipment depends both on the depth and reliability of knowledge of heat exchange phenomena and on the adequacy of modeling various thermophysical processes. In order to create effective methods for diagnosing and identifying such processes, experimental studies are conducted and their results are processed. These methods can be based on solutions of inverse problems of heat conduction for both homogeneous and composite media. In some cases, methods for solving inverse problems are the only means of obtaining the necessary information about the object under study. This paper presents a mathematical model for determining the temperature field of a specially designed thermal probe rod and a method for solving the boundary inverse problem of thermal conductivity (BIP), which is reduced to determining heat flows and heat transfer coefficients based on experimental temperature measurements at one or more internal points. The value of the heat flow and the heat transfer coefficient at the working end of the thermoprobe rod when it is cooled by liquid will be determined as a result of solving the OZT. The solution itself will be performed by a direct method, and its implementation will be carried out numerically.

Keywords: thermal interaction, high-temperature surface, boundary conditions of heat transfer, reliability of results, physical modeling method, correctness of the problem solution, method of experimental determination of local conditions of heat transfer, identification of boundary conditions of heat transfer, inverse problem of heat conduction.