

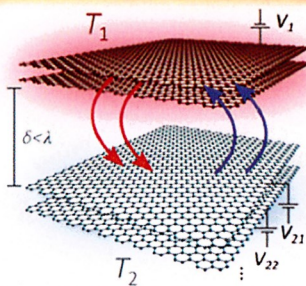
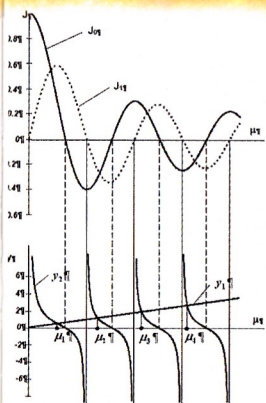
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеський національний технологічний університет



# МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Бошкова І. Л., Волгушева Н. В.



$$\operatorname{erfz} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-t^2} \cdot dt$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_V$$

2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Одеський національний технологічний університет**

**Методи дослідження процесів теплообміну**

**Навчальний посібник**

**Бошкова І.Л., Волгушева Н.В.**

Одеса – 2024

*Рекомендовано вченою радою  
Одеського національного технологічного університету.  
Протокол № 6 від 04.12.2024.*

**Автори:**

д.т.н. проф. Бошкова Ірина Леонідівна  
к.т.н. доц. Волгушева Наталя Вікторівна

**Рецензенти:**

– д. т. н., проф. В. Д. Петраш, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Одеської державної академії будівництва і архітектури;  
– д. т. н., проф. О. Я. Хлієва, професор кафедри судового допоміжного обладнання і холодильної техніки Національний університет «Одеська морська академія»;  
– д. т. н., проф. В. О. Мазур, професор каф. термодинаміки та відновлювальної енергетики Одеського національного технологічного університету.

**Методи дослідження процесів теплообміну. Навчальний посібник /**  
М 54 Бошкова І. Л., Волгушева Н. В. – Одеса : Бондаренко М. О., 2024 – 124 с.,  
бібліографія – 30 літературних джерела.

ISBN 978-617-8511-22-7

У даному навчальному посібнику наведені розрахункові та експериментальні методи вивчення процесів теплообміну. В першій частині розглядається розв'язання задач теплопровідності точними та наближеними аналітичними методами, окрема увага приділяється теплопровідності при зміні агрегатного стану тіла. Наведено метод суперпозиції для вирішення задач теплопровідності зі складними граничними і початковими умовами. Представлені методи вирішення задач нестационарної теплопровідності тіл правильної та неправильної форми, розглянуті нелінійні задачі теплопровідності. Друга частина присвячена експериментальним методам створення і визначення теплових потоків, зокрема електрообігрів та рідинний обігрів. Наведено методiku визначення теплофізичних характеристик твердих тіл та коефіцієнтів тепловіддачі методом стаціонарного та регулярного режиму. Наведені схеми експериментальних установок для дослідження процесу тепловіддачі. Посібник призначений для студентів бакалаврів за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», а також може бути корисним для студентів енергетичних спеціальностей та для працівників науково-дослідних лабораторій.

УДК 536.24(075.8)

ISBN 978-617-8511-22-7

© Бошкова І. Л., 2024  
© Волгушева Н. В., 2024

<b>Вступ</b>	5
<b>Частина перша. Розрахункові методи</b>	7
1. Математична модель процесу теплопровідності	8
2. Розв'язання задач теплопровідності точними аналітичними методами	12
2.1. Коротка характеристика методів	12
2.2. Нестационарна теплопровідність класичних тіл (розв'язання методом розділення змінних)	16
2.3. Нестационарна теплопровідність напівобмеженого масиву (розв'язання методом інтегрального перетворення Лапласа)	25
2.4. Нестационарна теплопровідність необмежених і напівобмежених тіл (розв'язання методом джерел)	29
2.5. Теплопровідність при зміні агрегатного стану тіла (розв'язання методом розділення змінних)	33
3. Розв'язання задач теплопровідності наближеними аналітичними методами	39
3.1. Нестационарна теплопровідність тіл правильної форми (розв'язання методом виключення змінних)	39
3.2. Нестационарна теплопровідність тіл неправильної форми (розв'язання методом стабільності теплового потоку)	43
3.3. Задачі теплопровідності зі складними граничними і початковими умовами (розв'язання методом суперпозиції)	45
3.4. Нелінійні задачі теплопровідності	47
4. Розв'язання задач теплопровідності чисельним методом	49
5. Теоретичні основи методу аналогій	56
<b>Частина друга. Експериментальні методи</b>	59
6. Методи створення і визначення теплових потоків	60
6.1. Електричний обігрів	60
6.2. Рідинний обігрів	61
6.3. Визначення теплових потоків методом товстостінної труби	63
6.4. Визначення локальних теплових потоків за допомогою датчиків	64
7. Методи визначення теплофізичних характеристик твердих тіл	65
7.1. Визначення коефіцієнта теплопровідності методом стаціонарного режиму	65
7.2. Визначення теплофізичних характеристик методом регулярного режиму	67

7.2.1. Основні теоретичні положення методу	67
7.2.2. Методи регулярного режиму першого роду	70
7.2.3. Метод регулярного режиму другого роду	75
7.2.4. Метод монотонного нагрівання зразка	76
7.3. Комплексні методи визначення теплофізичних характеристик	79
8 Методи визначення коефіцієнтів тепловіддачі	82
8.1. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі методом стаціонарного режиму	82
8.2. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі методом регулярного режиму	85
8.3. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі методом аналогії з масовіддачею	87
8.4. Схеми експериментальних установок для дослідження тепловіддачі при течії рідини в каналах	89
8.5. Схеми експериментальних установок для дослідження тепловіддачі газів	96
9 Дослідження теплових процесів методом електротеплової аналогії	99
9.1. Види електричних моделей	99
9.2. Дослідження процесів теплопровідності	103
9.3. Дослідження процесів конвективного теплообміну	105
<b>Перелік посилань</b>	108
<b>Додаток</b>	111
Таблиця 1. Функція помилок	112
Таблиця 2. Коріння характеристичного рівняння $\mu_0$ для розрахунку теплопровідності у необмеженій пластині	114
Таблиця 3. Коріння характеристичного рівняння $\mu_0$ для розрахунку теплопровідності в циліндрі нескінченної довжини	116
Таблиця 4. Коріння характеристичного рівняння $\mu_0$ для розрахунку теплопровідності в кулі	117
Таблиця 5. Функції Бесселя першого роду нульового та першого порядків $J_0(x)$ , $J_1(x)$	118
Таблиця 6. Модифіковані функції Бесселя першого роду нульового та першого порядків $I_0(x)$ , $I_1(x)$	122
Таблиця 7. Модифіковані функції Бесселя другого роду нульового та першого порядків $K_0(x)$ , $K_1(x)$	123

## ВСТУП

У даному навчальному посібнику розглядаються розрахункові й експериментальні методи дослідження процесів тепло- і масопереносу. Основою теоретичних методів є математичне моделювання, що включає: а) створення математичних моделей, що відбивають причинно-наслідкові зв'язки явищ; б) дослідження математичних моделей, розв'язання конкретних задач. Експериментальні дослідження проводять з метою: а) верифікації (перевірки форми і змісту) математичних моделей; б) визначення коефіцієнтів моделей; в) виявлення нових закономірностей.

Модель – це уявний чи математичний образ, що відбиває властивості фізичного явища. При побудові моделі теплового процесу від фізичної реальності (натури) переходять до теплової схеми, а потім формують математичну модель. Математична модель – це опис явищ за допомогою математичної символіки. Рівняння моделі дозволяють імітувати поведінку об'єкта досліджень у різних умовах, що описуються параметрами моделі. Створення моделі – найважливіший етап будь-якої теорії. Модель повинна пояснювати факти, що спостерігаються, тобто досить адекватно відбивати реальність, і, крім того, передбачати ще невідомі факти. Вона повинна бути коректною, тобто малі помилки не повинні приводити до помітних наслідків (принцип коректності Адамара). За точністю вона повинна відповідати вихідним даним і можливості її реалізації. Необхідно, щоб модель задовольняла вимогам економічності. Математичні моделі поділяються на дві групи: а) неявні – це рівняння (алгебраїчні, диференціальні, інтегродиференціальні), які потрібно розв'язувати, щоб одержати залежність шуканої величини від інших, заданих - аргументів; б) явні – це результати рішення, тобто явна залежність шуканої величини від аргументів (наприклад, температури від координат і часу). Явну модель одержують шляхом розв'язання неявної. Неявні моделі одержують на основі законів збереження енергії і переносу теплоти. Класифікація задач проводиться за різними незалежними ознаками [1]. Найбільш важлива ознака – теплофізична, що визначає вид теплопереносу. За

цією ознакою розрізняють класи задач теплопровідності, конвективного, променистого, складного теплообміну.

Інша ознака, важлива з методичної точки зору, визначає мету розрахунку – це наслідок або причина. За цією ознакою розрізняють задачі: а) прямі – у них задані причини, а шуканими величинами є наслідки (за заданими умовами однозначності знаходять розподіл температур); б) зворотні – у них задані наслідки, а шуканими величинами є причини (по відомому з досліду розподілу температур знаходять величини, що входять в умови однозначності, тобто властивості середовища, граничні або початкові умови).

Використовують і інші ознаки класифікації – по типу залежності температури від часу (стаціонарні, нестаціонарні задачі), координат (просторові, одномірні), типу граничних умов (I, II, III, IV роду) і ін.

Задачі, у яких визначають температуру в двох і більше взаємодіючих середовищах, називають взаємозв'язаними (наприклад, визначення температурного поля в стінці й омиваючій її рідині).

При вивченні явищ тепломасообміну, побудові математичних моделей далі використовується феноменологічний підхід. У першій частині розглянуті теоретичні методи дослідження процесів теплопровідності, у другій – експериментальні методи. У додатку приведені контрольні питання та задачі для практичних занять та самостійної роботи.



### **БОШКОВА Ірина Леонідівна**

Бошкова Ірина Леонідівна. Закінчила Одеський технологічний інститут холодильної промисловості за спеціальністю «Теплофізика» у 1981 р. У 1995 р. захистила кандидатську дисертацію на тему «Термоакустичні явища при кипінні недогрітої рідини в парогенеруючих каналах радіоелектронної апаратури», спеціальність 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. У 2015 р. захистила докторську дисертацію на тему «Інтенсифікація процесів тепломасоперенесення в рослинних матеріалах при дії мікрохвильового електромагнітного поля», спеціальність 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Професор кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики, Навчально-наукового інституту холоду, кріотехнології та екологічної енергії ім. В.С. Мартиновського, Одеського національного технологічного університету.



### **ВОЛГУШЕВА Наталя Вікторівна**

Волгушева Наталя Вікторівна у 1997 році з відзнакою закінчила Одеську державну академію холоду за спеціальністю «Теплофізика» та отримала кваліфікацію спеціаліста інженера-теплофізика. У жовтні 2005 року Волгушева Н.В. захистила кандидатську дисертацію за спеціальністю 05.14.06 технічна теплофізика та промислова теплоенергетика на тему «Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти». У 2023 році отримала ступінь магістра за спеціальністю «Нафтогазова інженерія та технології». Працює доцентом кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики.