

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсу лекцій з навчальної дисципліни

«Тепловий стан елементів енергетичного обладнання.

Окрема глава «Створення функцій користувача Excel».

Практичні приклади»

для студентів за спеціальністю

142 «Енергетичне машинобудування»

Харків

НТУ «ХП»

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсу лекцій з навчальної дисципліни

«Тепловий стан елементів енергетичного обладнання.

Окрема глава «Створення функцій користувача Excel».

Практичні приклади»

для студентів за спеціальністю

142 «Енергетичне машинобудування»

Затверджено редакційно-
видавничою радою університету,
протокол № 1 від 15.02.2024 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

Методичні вказівки до курсу лекцій з навчальної дисципліни «Тепловий стан елементів енергетичного обладнання. Окрема глава «Створення функцій користувача Excel». Практичні приклади» для студентів за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування» / уклад.: О.І. Тарасов, І. О. Михайлова – Харків : НТУ «ХПІ». – 2023. – 26 с.

Укладачі: О.І. Тарасов, І. О. Михайлова

Рецензент проф. О.О. Литвиненко

Кафедра турбінобудування

1 Лінійна інтерполяція.

1.1 Теорія

Теплофізичні властивості рідин та газів зазвичай видаються у табличному вигляді. Інші характеристики матеріалів також представляються у вигляді таблиць, в яких значення параметрів розміщуються дискретно. Для знаходження проміжних значень використовується лінійна інтерполяція.

Лінійна інтерполяція передбачає, зміни параметрів змінюються за лінійно-кусочним законом, тобто. передбачається, що функція між двома найближчими значеннями аргументу змінюється лінійно.

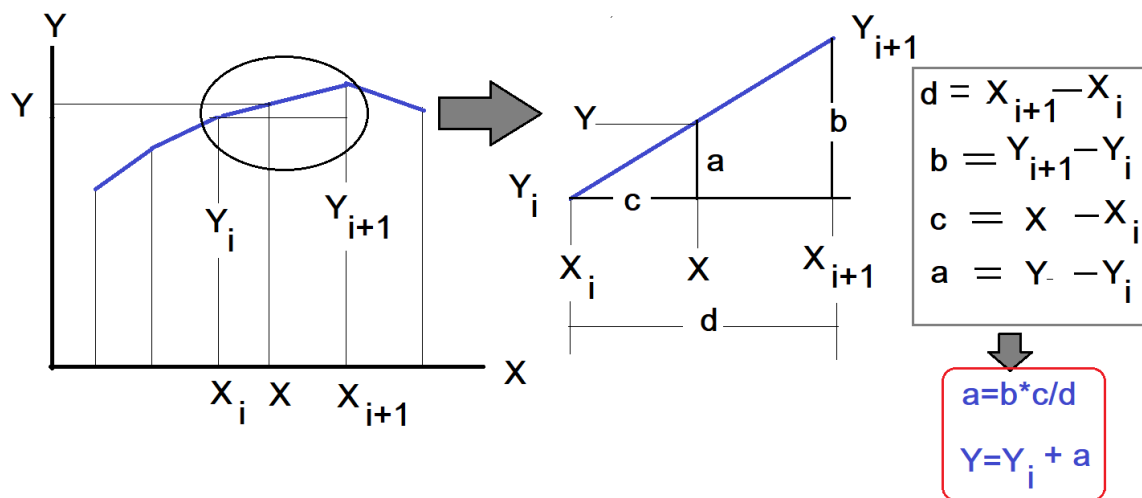


Рисунок 1. – Алгоритм лінійної інтерполяції

Алгоритм лінійної інтерполяції досить простий.

1. У першому етапі здійснюється пошук інтервалу, всередину чи межу куди потрапляє шукане значення аргументу X .
2. На другому етапі використовується властивість подібності трикутників для знаходження відрізка " a ", а потім обчислюється значення функції Y .
Весь алгоритм показано на рисунку 1.

Завдання 1. Функція для розрахунку критерія Прандтля для масла МС-20

Створити функції, які розраховують властивості масла МС-20 в залежності від температури. Застосувати лінійну інтерполяцію даних таблиці властивостей масла МС-20, яка наведена нижче.

Таблиця 1 – Фізичні властивості масла МС-20

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/кг К}$	$\lambda, \text{Вт/м К}$	$\mu*10^6, \text{Па*с}$	$\nu*10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a*10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta*10^4, 1/\text{К}$	Pr
-10	990,3	1,951	0,136	-	-	7,75	6,24	-
0	903,6	1,98	0,135	-	-	7,58	6,27	-
10	897,9	2,01	0,135	-	-	7,44	6,31	-
20	892,3	2,043	0,134	10026	1125	7,3	6,35	15400
30	886,6	2,072	0,132	4670	526	7,19	6,38	7310
40	881	2,106	0,131	2433	276	7,08	6,42	3800
50	875,3	2,135	0,13	1334	153	7	6,46	2180
60	869,6	2,165	0,129	798,5	91,9	6,86	6,51	1340
70	864	2,198	0,128	498,3	58,4	6,75	6,55	865
80	858,3	2,227	0,127	336,5	39,2	6,67	6,6	588
90	852,7	2,261	0,126	234,4	27,5	6,56	6,64	420
100	847	2,29	0,125	171,7	20,3	6,44	6,69	315
110	841,3	2,32	0,124	132,4	15,7	6,35	6,73	247
120	835,7	2,353	0,123	101	12,1	6,35	6,77	193
130	830	2,382	0,122	79,76	9,61	6,17	6,82	156
140	824,4	2,42	0,121	61,8	7,5	6,08	6,87	123
150	818,7	2,445	0,12	53,17	6,5	6	6,92	108

Назва функції може бути довільною, але краще називати функцію таким ім'ям, щоб інтуїтивно можна було зрозуміти її призначення. Тому назвем цю функцію як **Pr_M20**.

Зауважимо, що Бейсик вимагає, щоб у кожному рядку був один оператор. Проте задля економії місця текст коду тут представлено в дві колонки. Декілька операторів зайняли два рядки. Це не допустиме написання в редакторі VBA.

Наприклад, оператор

$$\text{Pr_M20} = \text{Pr}(i_0) + (\text{Pr}(i_0 + 1) - \text{Pr}(i_0)) / (\text{temp}(i_0 + 1) - \text{temp}(i_0)) * (T - \text{temp}(i_0))$$

має бути написаний так

$$\text{Pr_M20} = \text{Pr}(i_0) + (\text{Pr}(i_0 + 1) - \text{Pr}(i_0)) / (\text{temp}(i_0 + 1) - \text{temp}(i_0)) * (T - \text{temp}(i_0))$$

На початку коду вводяться значення температури i критерію Прандтля.

Далі застосовуємо перевірку чи попадає значення температури у інтервал температур таблиці. Якщо інтервал знайдено, то обчислюється число Прандтля, яке присвоюється ідентифікатору функції.

Таблиця 2 – Код програми

Початок	Продовження
Public Function Pr_M20(T As Double) As Double Dim temp(0 To 13) As Double Dim Pr(0 To 13) As Double Dim K As Integer Dim i0 As Integer temp(0) = 20 temp(1) = 30 temp(2) = 40 temp(3) = 50 temp(4) = 60 temp(5) = 70 temp(6) = 80 temp(7) = 90 temp(8) = 100 temp(9) = 110 temp(10) = 120 temp(11) = 130 temp(12) = 140 temp(13) = 150 Pr(0) = 15400 Pr(1) = 7310 Pr(2) = 3890	Pr_M20 = 0 'якщо розрахунок невдалий, то буде 0 If temp(0) > T Then Pr_M20 = Pr(0) MsgBox ("Температура менше ніж 20С. Розрахунок не можливий!") GoTo MM End If If temp(13) > T Then 'Пошук інтервалу For K = 0 To 13 If temp(K) >= T Then i0 = K - 1 Exit For End If Next K 'розрахунок критерія Pr Pr_M20 = Pr(i0) + (Pr(i0 + 1) - Pr(i0)) / (temp(i0 + 1) - temp(i0)) * (T - temp(i0)) Else MsgBox ("Температура більше ніж 150С. Розрахунок не можливий!") Pr_M20 = Pr(13)

Pr(3) = 2180 Pr(4) = 1340 Pr(5) = 865 Pr(6) = 588 Pr(7) = 420 Pr(8) = 315 Pr(9) = 247 Pr(8) = 315 Pr(9) = 247 Pr(10) = 193 Pr(11) = 156 Pr(12) = 123 Pr(13) = 108	End If MM: End Function
---	-------------------------------

Таблиця 3 – Варіанти завдання

№	Параметр (укр.)	Parameter	Позначення та розмірність	Назва функції
1	Густина	Density	ρ , кг/м ³	Dens_M20
2	Теплоємність	Heat capacity	C_p , кДж/кг·К	HeatCapacity_M20
3	Теплопровідність	Conductivity	λ , Вт/м ² ·К	Conductivity_M20
4	Динамічна в'язкість	Dynamic Viscosity	μ , Па·с	DViscosity_M20
5	Кінематична в'язкість	Viscosity	ν , м ² /с	Viscosity_M20
6	Температуропровідність	Temperature conductivity	a , м ² /с	TemConductivity_M20
7	Критерій Прандтля	Prandtl number		Pr_M20

Для програмування використати приклад функції розрахунку числа Pr для мастила M-20 в середовище VBA.

1.2 Завдання 2. Двопараметрична інтерполяція

У вентиляційних системах часто зустрічаються з'єднання, які називають трійниками. Витяжний трійник має прохідний канал та бічне

відгалуження. Повітря через ці два рукави зливається до збірному рукаву (каналу).

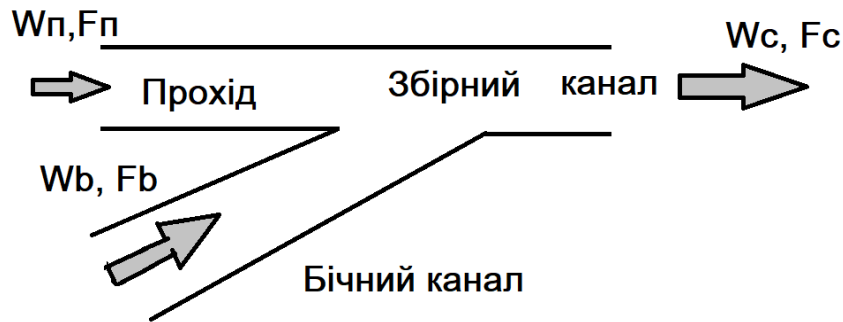


Рисунок 2 – Модель задачі

Гідравлічний опір між бічним і збірним рукавами визначається як

$$\zeta_{з.б} = \frac{\Delta P_{\delta}}{\rho w_c^2 / 2} = A \zeta'_{з.б} \quad (1)$$

Для розрахунку $\zeta'_{з.б}$ маємо таблицю 4. Бачимо, що ця змінна залежить від двох параметрів, а саме від відношення об'ємних витрат Q_b/Q_c і відношення поперечних перетинів площ бічного і збірного каналів F_b/F_c .

Таблиця 4 – Дані для розрахунку гідравлічного опору по залежності (1)

Q_b/Q_c	F_b/F_c						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
0	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000
0,1	0,210	-0,455	-0,566	-0,600	-0,621	-0,626	-0,627
0,2	3,040	0,380	-0,062	-0,200	-0,282	-0,303	-0,308
0,3	7,490	1,505	0,510	0,200	0,015	-0,031	-0,043
0,4	13,560	2,920	1,151	0,600	0,271	0,190	0,168
0,5	21,250	4,625	1,861	1,000	0,486	0,359	0,325
0,6	30,560	6,620	2,640	1,400	0,660	0,478	0,428
0,7	41,490	8,905	3,488	1,800	0,793	0,544	0,477
0,8	54,040	11,480	4,404	2,200	0,884	0,560	0,472
0,9	68,210	14,345	5,390	2,600	0,935	0,524	0,413
1	84,000	17,500	6,444	3,000	0,944	0,438	0,300

Завдання – створити функцію двопараметричної інтерполяції значень $\zeta'_{3.б}$ у таблиці.

1.3 Завдання 3. Гідравлічний опір круглого каналу

Створити функцію, яка розраховує коефіцієнт гідравлічного опору λ у круглому каналі.

Застосувати у якості вхідних даних масову витрату повітря G (кг/с), d (мм) діаметр, температуру T (°C), тиск P (бар).

Також створити функцію для гідравлічного опору, якщо відома швидкість повітря (газу) замість її витрати.

Теорія.

Коефіцієнт гідравлічного опору ζ дозволяє визначити втрати повного тиску в круглій трубі як частка кінетичної енергії потоку за формулою

$$\Delta p^* = \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (2)$$

де ζ залежить від довжини труби L і її діаметру d , а також від опору одного калібру труби λ

$$\zeta = \lambda \frac{L}{d}. \quad (3)$$

Значення λ залежать від числа Рейнольдса і визначаються формулами нижче.

Таблиця 5 – Залежність значення λ від числа Рейнольдса

Діапазон	Рівняння
Re<2000	$\lambda_{fr} = \frac{64}{Re}$
Re<4500	$\lambda_{fr} = 0.04267 \cdot (\log_{10} Re) - 0.1134$
Re<10000 0	$\lambda_{fr} = -0.00567 \cdot (\log_{10} Re)^3 + 0.08122 \cdot (\log_{10} Re)^2 - 0.3983 \cdot \log_{10} Re + 0.6872$
Re>10000 0	$\lambda_{fr} = 0.0009745 \cdot (\log_{10} Re)^2 - 0.01652 \cdot \log_{10} Re + 0.07597$

Критерій Рейнольдса має вигляд $Re = \frac{wd}{\nu}$, тобто швидкість помножена

на діаметр та поділена на кінематичну в'язкість повітря

$$\nu = \frac{14,075 \cdot 10^{-6}}{P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,68} \quad [m^2/c], P[бар], T[K]$$

Швидкість знаходимо з рівняння нерозривності $G = \rho w \frac{\pi d^2}{4}$, де

густина знаходиться як $\rho = \frac{P}{RT} = \frac{P}{287,3T}$. Тут температура задається в

градусах Кельвіна, а тиск в Паскалях.

Майте на увазі, що між тиском у барах і Паскалях є таке відношення
1 бар = 10⁵ Па. Температура у градусах Кельвіна і Цельсія відносяться як

$$T = t + 273,15.$$

Нижче наведено коди для функцій в залежності від вхідних параметрів.

Таблиця 6 – Код програми

Static Function Log10(X) Log10 = Log(X) / Log(10#) End Function 'Hydraulic resistance coefficient Public Function HydrResCoeff (G As Double, d As Double, t As Double, p As Double) As Double 'T - temperature in K 'P - pressure in Pa 'D - diameter in m Dim Re As Double Dim visc As Double Dim velocity As Double Dim area As Double Dim density As Double t = t + 273.15 d = d / 1000 'усі оператори мають бути записані в одно строку visc = 0.000014075 / p * (t / 273.15) ^ 1.68	Public Function HydrResCoeff1 (velocity As Double, d As Double, t As Double, p As Double) As Double 'T - temperature in K 'P - pressure in Pa 'D - diameter in m Dim Re As Double Dim visc As Double Dim area As Double Dim density As Double t = t + 273.15 d = d / 1000 'усі оператори мають бути записані в одно строку visc = 0.000014075 / p * (t / 273.15) ^ 1.68 area = 3.14159265358979 * d ^ 2 / 4 Re = velocity * d / visc
---	--

<pre> area = 3.14159265358979 * d ^ 2 / 4 density = p * 100000 / 287.6 / t velocity = G / density / area Re = velocity * d / visc If Re < 2000 Then HydrResCoeff = 64 / Re Else If Re < 4500 Then HydrResCoeff = 0.04267 * Log10(Re) - 0.1134 Else If Re < 100000 Then HydrResCoeff = -0.00567 * (Log10(Re)) ^ 3 + 0.08122 * (Log10(Re)) ^ 2 - 0.3983 * Log10(Re) + 0.6872 Else HydrResCoeff = 0.0009745 * (Log10(Re)) ^ 2 - 0.01652 * Log10(Re) + 0.07597 If HydrResCoeff < 0 Then HydrResCoeff = 0 MsgBox ("Коефіцієнт не може бути від'ємним. Надаємо йому 0!") End If End If End If End Function </pre>	<pre> If Re < 2000 Then HydrResCoeff1 = 64 / Re Else If Re < 4500 Then HydrResCoeff1 = 0.04267 * Log10(Re) - 0.1134 Else If Re < 100000 Then HydrResCoeff1 = -0.00567 * (Log10(Re)) ^ 3 + 0.08122 * (Log10(Re)) ^ 2 - 0.3983 * Log10(Re) + 0.6872 Else HydrResCoeff1 = 0.0009745 * (Log10(Re)) ^ 2 - 0.01652 * Log10(Re) + 0.07597 If HydrResCoeff1 < 0 Then HydrResCoeff1 = 0 MsgBox ("Коефіцієнт не може бути від'ємним. Надаємо йому 0!") End If End If End If End Function </pre>
---	---

1.4 Завдання 4. Швидкість в каналі

Знайти швидкість W проходження повітря у трубі якщо є заданим діаметр труби d (м), температура T (К), тиск повітря P (Па) і витрата повітря G (кг/с).

Таблиця 7 – Приклад програмування.

```

Public Function Velocity(G As Double, d As Double, t As Double, p As Double) As Double
'T - temperature in K
'P - pressure in Pa
'D - diameter in m

Dim Re As Double
Dim visc As Double
Dim velocity As Double
Dim area As Double
Dim density As Double

t = t + 273.15
d = d / 1000
area = 3.14159265358979 * d ^ 2 / 4
density = p * 100000 / 287.6 / t
Velocity = G / area / density
End Function

```

1.5 Завдання 5. Одиниці виміру температури

Створити функцію для переведення температури у градусах Цельсія до температури у градусах Фаренгейта

Формула переведення градусів Фаренгейта (°F) в градуси Цельсія (°C) і навпаки від Цельсія (°C) до Фаренгейта (°F):

(Фаренгейт — 32) : 1,8 = Цельсій

Приклад: (50°F - 32) : 1,8 = 10°C. Цельсій x 1,8 + 32 = Фаренгейт

Приклад: 10°C x 1,8 + 32 = 50°F.

Таблиця 8 – Приклад програмування

```

'переведення градусів з шкали Фаренгейта в шкалу Цельсія
Function Celsius(fDegrees)
Celsius = (fDegrees - 32) * 5 / 9
End Function

```

1.6 Завдання 6. Нагрів та охолодження нескінченної пластини

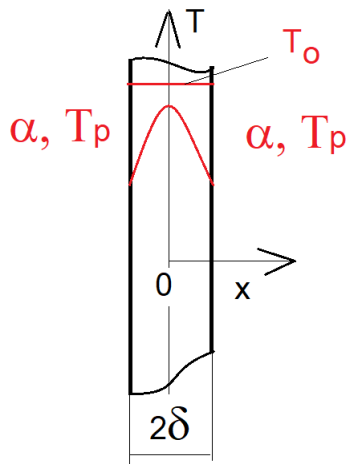


Рисунок 3 –

До нагріву і охолодженню пластини нескінченної довжини

Створити функцію для розрахунку температури нескінченної пластини, яка нагрівається або охолоджується.

Теорія.

Маємо нескінченну пластину, яка нагрівається починаючи з температури T_0 при граничних умовах III роду (заданими є температура рідини і коефіцієнт тепловіддачі).

Якщо ввести безрозмірну температуру

$$\theta = \frac{T - T_p}{T_0 - T_p} \text{ і безрозмірну координату } X = \frac{x}{\delta},$$

починаючи від площі симетрії, то рішення для правої частини має вигляд

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\text{Sin}(\mu_n)}{\mu_n + \text{Sin}(\mu_n)\text{Cos}(\mu_n)} \text{Cos}(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}), \quad (4)$$

де μ_m є корені характеристичного рівняння

$$\text{Ctg}(\mu) = \frac{\mu}{\text{Bi}} \quad (5),$$

$$\text{Bi} = \frac{\alpha \delta}{\lambda}, \quad \text{Fo} = \frac{a \tau}{\delta^2} - \text{критерії Біо і Фур'є,}$$

τ - час у секундах,

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} - \text{температуропровідність.}$$

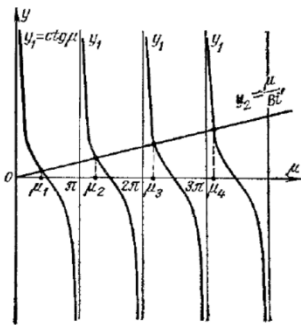


Рисунок 4 – До рішення рівняння 5

Мета: створити функцію розрахунку

безрозмірної температури у точці X , яка залежить від критерія Bi і критерія Fo – безрозмірного часу.

Рішення задачі складається з двох етапів:

1. Написання функції для розрахунку коренів характеристичного рівняння (5),

2. Написання функції для розрахунку (4), тобто $\theta = f(X, Bi, Fo)$.
3. Сума (4) має 4 члена

1.7 Пошук коренів характеристичного рівняння (5)

1.7.1 Метод простої ітерації

Часто для рішення трансцендентних рівнянь $y(x) = 0$ застосовується метод простої ітерації, який полягає у ітераційному уточненні рішення по алгоритму

$$x_{i+1} = y(x_i) + x_i = Y(x_i).$$

Але цей метод має обмеження. Покажемо графічно суть методу. Бачимо, що метод не завжди забезпечує збіжність до рішення.

Виявіть умови збіжності!!!

Застосуйте цей метод для розв'язання рівняння (5).

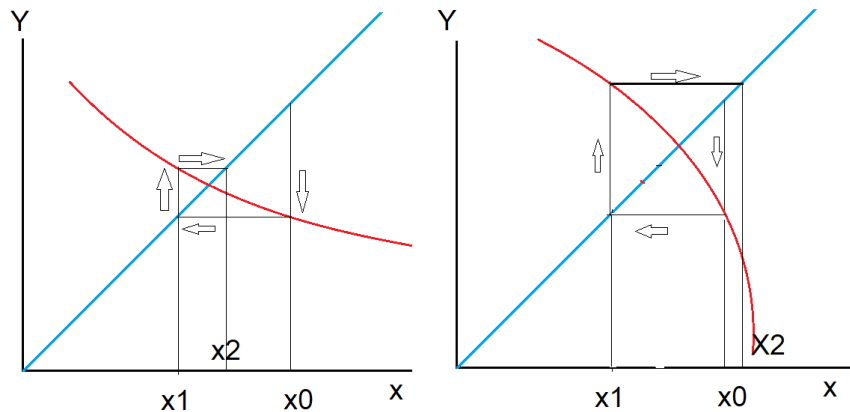


Рисунок 5 – Графічне представлення методу простої ітерації

1.7.2 Метод сікучої

Корені рівняння $y(x) = 0$ можуть бути визначені в наближенні до сікучої. По-перше потрібно визначити інтервал аргументу, де функція має корінь.

По-друге застосовується проста залежність для визначення першого наближення.

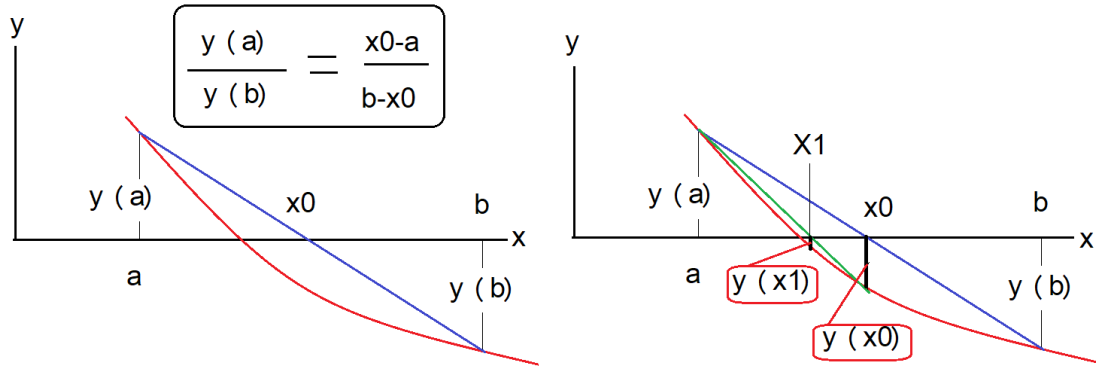


Рисунок 6 – Графічне представлення методу сікучої

Раніше інженери працювали з таблицями, у яких були дані значення чотирьох коренів характеристичного рівняння. Зараз ця таблиця наведена для перевірки функції рішення характеристичного рівняння (5).

Значення μ_n для пластини

ВІ	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	ВІ	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
0	0,0000	3,1416	6,2832	9,4248	1,0	0,8603	3,4256	6,4373	9,5293
0,001	0,0316	3,1419	6,2833	9,4249	1,5	0,9882	3,5422	6,5097	9,5801
0,002	0,0447	3,1422	6,2835	9,4250	2,0	1,0769	3,6436	6,5783	9,6296
0,004	0,0632	3,1429	6,2838	9,4252	3,0	1,1925	3,8088	6,7040	9,7240
0,006	0,0774	3,1435	6,2841	9,4254	4,0	1,2646	3,9352	6,8140	9,8119
0,008	0,0893	3,1441	6,2845	9,4256	5,0	1,3138	4,0336	6,9096	9,8928
0,01	0,0998	3,1448	6,2848	9,4258	6,0	1,3496	4,1116	6,9924	9,9667
0,02	0,1410	3,1479	6,2864	9,4269	7,0	1,3766	4,1746	7,0640	10,0339
0,04	0,1987	3,1543	6,2895	9,4290	8,0	1,3978	4,2264	7,1263	10,0949
0,06	0,2425	3,1606	6,2927	9,4311	9,0	1,4149	4,2694	7,1806	10,1502
0,08	0,2791	3,1668	6,2959	9,4333	10,0	1,4289	4,3058	7,2281	10,2003
0,1	0,3111	3,1731	6,2991	9,4354	15,0	1,4729	4,4255	7,3959	10,3898
0,2	0,4328	3,2039	6,3148	9,4459	20,0	1,4961	4,4915	7,4954	10,5117
0,3	0,5218	3,2341	6,3305	9,4565	30,0	1,5202	4,5615	7,6057	10,6543
0,4	0,5932	3,2636	6,3461	9,4670	40,0	1,5325	4,5979	7,6647	10,7334
0,5	0,6533	3,2923	6,3616	9,4775	50,0	1,5400	4,6202	7,7012	10,7832
0,6	0,7051	3,3204	6,3770	9,4879	60,0	1,5451	4,6353	7,7259	10,8172
0,7	0,7506	3,3477	6,3923	9,4983	80,0	1,5514	4,6543	7,7573	10,8606
0,8	0,7910	3,3744	6,4074	9,5087	100,0	1,5552	4,6658	7,7764	10,8871
0,9	0,8274	3,4003	6,4224	9,5190	∞	1,5708	4,7124	7,8540	10,9956

Значення безрозмірної температури інженери знаходили за допомогою номограм для поверхні пластини та у площі симетрії. Номограми тут наведені для перевірки створеної функції рішення (4).

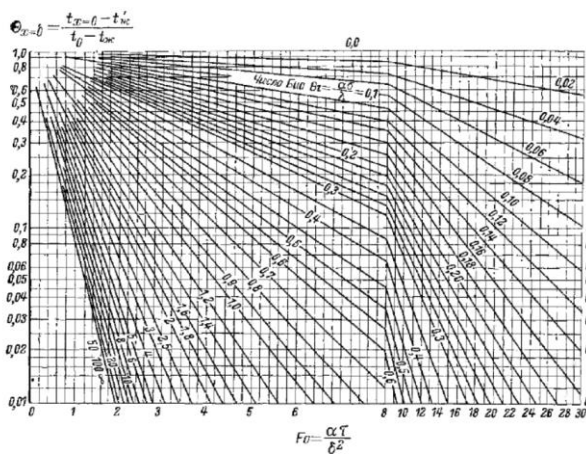


Рисунок 7 – Залежність $\theta=f_1(Fo, Bi)$ для середини пластини

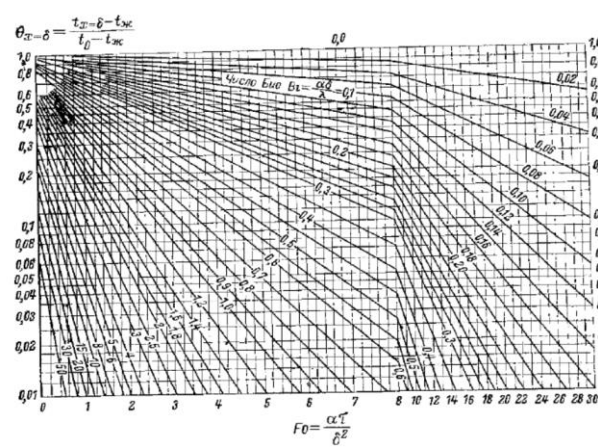


Рисунок 8 – Залежність $\theta=f_2(Fo, Bi)$ для поверхні пластини

Приклад програмування рішення характеристичного рівняння (5) наведено зліва, а код знаходження безрозмірної температури пластини справа.

Таблиця 9 – Приклад програмування

<pre>'корні характеристичного рівняння (2) для пластини 'усі оператори мають бути записані в одну строку Public Function mFromBi(Bi As Double, k As Integer) As Double Dim step As Double Dim m0 As Double Dim m1 As Double Dim i As Integer Dim i0 As Integer Dim i1 As Integer Dim a As Double Dim a1 As Double Dim flag As Integer Dim upBound As Integer Dim X As Double Dim y As Double Dim x1 As Double flag = 1 step = 0.5 upBound = (3.14159265358979 / 2 + 3.14159265358979 * (k - 1)) / step</pre>	<pre>'розрахунок безрозмірної температури пластини Public Function TempPlate(Bi As Double, Fo As Double, X As Double) As Double Dim T As Double Dim m As Double Dim i As Integer T = 0 For i = 1 To 4 m = mFromBi(Bi, i) T = T + 2 * Sin(m) / (m + Sin(m) * Cos(m)) * Cos(m * X) * Exp(-m * m * Fo) Next i TempPlate = T End Function</pre>
---	---

```
m0 = 0.01 + 3.14159265358979 * (k - 1)
```

```
a = m0 - Bi / Tan(m0)
```

```
'це значення функції у точці m0
```

```
If a < 0 Then
```

```
flag = -1
```

```
End If
```

```
m = m0
```

```
For i = 0 To upBound
```

```
  m = m + step
```

```
  a = flag * (m - Bi / Tan(m))
```

```
'це значення функції у точці m
```

```
  If a < 0 Then
```

```
    i1 = i
```

```
    a1 = -a
```

```
    m1 = m
```

```
  Exit For
```

```
  End If
```

```
Next i
```

```
m0 = m1 - step
```

```
a = flag * (m0 - Bi / Tan(m0))
```

```
s = 0
```

```
Do
```

```
X = (a * m1 + a1 * m0) / (a + a1)
```

```
y = flag * (X - Bi / Tan(X))
```

```
s = s + 1
```

```
If y > 0 Then
```

```
  a = y
```

```
  m0 = X
```

```
'x = (a * m1 + a1 * m0) / (a + a1)
```

```
ElseIf y < 0 Then
```

```
  a1 = -y
```

```
  m1 = X
```

```
'x = (a * m1 + a1 * m0) / (a + a1)
```

```
End If
```

```
Loop While Abs(y) > 0.0001
```

```
mFromBi = X
```

```
End Function
```

1.8 Завдання 7. Розрахунок нагріву та охолодження нескінченного циліндра

Створити функцію для розрахунку температури нескінченної циліндра, який нагрівається або охолоджується.

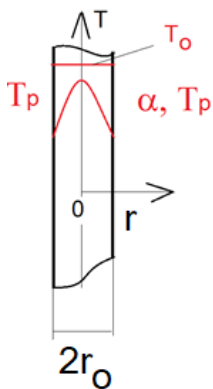


Рисунок 9 – До розрахунку нагріву та охолодження нескінченного циліндра

Теорія

Маємо нескінчений циліндр, який нагрівається починаючи з температури T_0 при граничних умовах III роду (заданими є температура рідини і коефіцієнт тепловіддачі).

Якщо ввести безрозмірну температуру

$$\theta = \frac{T - T_p}{T_0 - T_p} \text{ і безрозмірну координату } R = \frac{r}{r_0},$$

починаючи від осі обертання, то рішення для правої частини має вигляд

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} J_0(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (6)$$

де μ_m є корені характеристичного рівняння

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi} \quad (7),$$

$J_0(\mu), J_1(\mu)$ – функції Беселя першого роду нульового і першого порядку,

$$Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda}, \quad Fo = \frac{a\tau}{r_0^2} \text{ – критерії Біо і Фур'є}$$

відповідно,

$$\tau \text{ – час у секундах, } a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \text{ –}$$

температуропровідність.

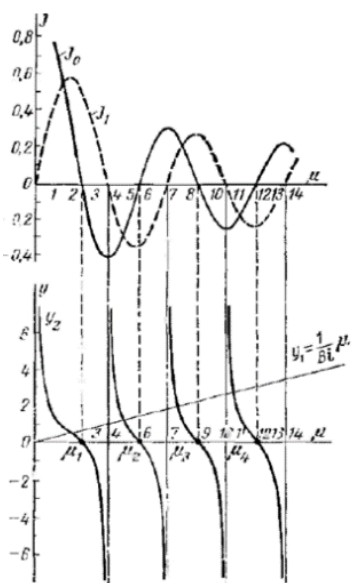


Рисунок 10 – До рішення рівняння 7

Мета: створити функцію розрахунку безрозмірної температури у точці X , яка залежить від критерія Bi і критерія Fo – безрозмірного часу.

Рішення задачі складається з двох етапів:

1. Написання функції для розрахунку коренів характеристичного рівняння (7),
2. Написання функції для розрахунку (6), тобто $\theta = f(X, Bi, Fo)$.
3. Сума (6) має 4 члена

Раніше інженери працювали з таблицями, у яких була дані значення чотирьох коренів характеристичного рівняння. Зараз ця таблиця наведена для перевірки функції рішення характеристичного рівняння (7).

Значення μ_n для циліндра

Bi	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	Bi	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
0,0	0,0000	3,8317	7,0156	10,1735	2,0	1,5994	4,2910	7,2884	10,3658
0,01	0,1412	3,8343	7,0170	10,1745	3,0	1,7887	4,4634	7,4103	10,4566
0,02	0,1995	3,8369	7,0184	10,1754	4,0	1,9081	4,6018	7,5201	10,5423
0,04	0,2814	3,8421	7,0213	10,1774	5,0	1,9898	4,7131	7,6177	10,6223
0,06	0,3438	3,8473	7,0241	10,1794	6,0	2,0490	4,8033	7,7039	10,6964
0,08	0,3960	3,8525	7,0270	10,1813	7,0	2,0937	4,8772	7,7797	10,7646
0,10	0,4417	3,8577	7,0298	10,1833	8,0	2,1286	4,9384	7,8464	10,8271
0,15	0,5376	3,8706	7,0369	10,1882	9,0	2,1566	4,9897	7,9051	10,8842
0,20	0,6170	3,8835	7,0440	10,1931	10,0	2,1795	5,0332	7,9569	10,9363
0,30	0,7465	3,9091	7,0582	10,2029	15,0	2,2509	5,1773	8,1422	11,1367
0,40	0,8516	3,9344	7,0723	10,2127	20,0	2,2880	5,2568	8,2534	11,2677
0,50	0,9408	3,9594	7,0864	10,2225	30,0	2,3261	5,3410	8,3771	11,4221
0,60	1,0184	3,9841	7,1004	10,2322	40,0	2,3455	5,3846	8,4432	11,5081
0,70	1,0873	4,0085	7,1143	10,2419	50,0	2,3572	5,4112	8,4840	11,5621
0,80	1,1490	4,0325	7,1282	10,2519	60,0	2,3651	5,4291	8,5116	11,5990
0,90	1,2048	4,0562	7,1421	10,2613	80,0	2,3750	5,4516	8,5466	11,6461
1,0	1,2558	4,0795	7,1558	10,2710	100,0	2,3809	5,4652	8,5678	11,6747
1,5	1,4569	4,1902	7,2233	10,3188	∞	2,4048	5,5201	8,6537	11,9309

Значення безрозмірної температури інженери знаходили за допомогою номограм для поверхні пластини та у площі симетрії. Номограми тут наведені для перевірки створеної функції рішення (6).

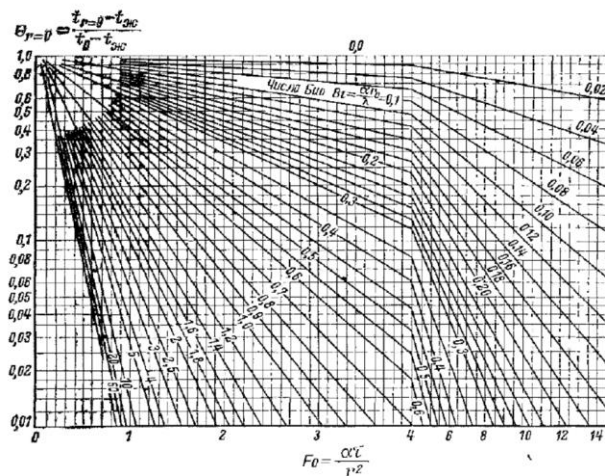


Рисунок 11 – Залежність $\theta = \Phi_1(Fo, Bi)$ для осі циліндру

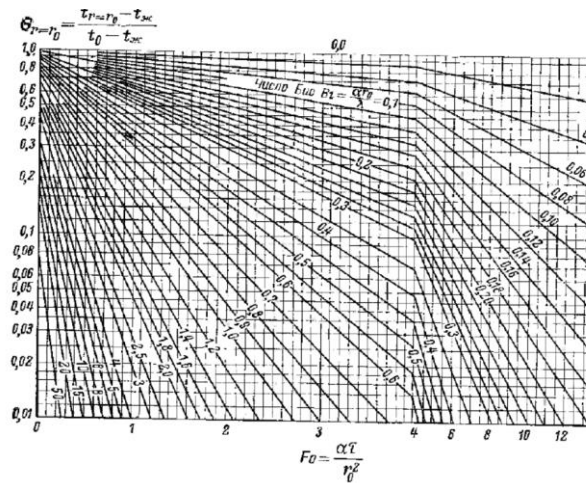


Рисунок 12 – Залежність $\theta = \Phi_2(Fo, Bi)$ для поверхні циліндру

Приклад програмування рішення характеристичного рівняння (7) наведено зліва, а код знаходження безрозмірної температури пластини справа.

Таблиця 10 – Приклад програмування

<p>'Корні характеристичного рівняння (7) для пластини 'усі оператори мають бути записані в одно строку 'відношення значень функцій Бесселя J0/J1 Public Function J0ToJ1(X As Double) As Double aa = WorksheetFunction.BesselJ(X, 0) bb = WorksheetFunction.BesselJ(X, 1) cc = aa / bb J0ToJ1 = cc End Function ' корні характеристичного рівняння для циліндра</p>	<p>'розрахунок безрозмірної температури циліндра Public Function TempCyl(Bi As Double, Fo As Double, R As Double) As Double Dim T As Double Dim m As Double Dim jmR As Double Dim j0 As Double Dim j1 As Double Dim i As Integer T = 0 For i = 1 To 4 m = mForCylFromBi(Bi, i) j0 = WorksheetFunction.BesselJ(m, 0) j1 = WorksheetFunction.BesselJ(m, 1)</p>
--	--

Public Function mForCylFromBi (Bi As Double, k As Integer) As Double Dim step As Double Dim m0 As Double Dim m As Double Dim m1 As Double Dim i As Integer Dim i0 As Integer Dim i1 As Integer Dim a As Double Dim a1 As Double Dim flag As Integer Dim nStep As Integer Dim X As Double Dim y As Double Dim x1 As Double flag = 1 nStep = 20 If k = 1 Then m0 = 0.1 step = (2.5 - m0) / nStep End If If k = 2 Then m0 = 3.832 step = (5.6 - m0) / nStep End If If k = 3 Then m0 = 7.016 step = (8.7 - m0) / nStep End If If k = 4 Then m0 = 10.1735 step = (11.8 - m0) / nStep End If	jmR = WorksheetFunction.BesselJ(m * R, 0) T = T + 2 * j1 / m / (j0 * j0 + j1 * j1) * jmR * Exp(-m * m * Fo) Next i TempCyl = T End Function
--	--

<pre> a = m0 - Bi * J0ToJ1(m0) 'це значення функції у точці m0 If a < 0 Then flag = -1 End If m = m0 For i = 0 To nStep m = m + step a = flag * (m - Bi * J0ToJ1(m)) 'це значення функції у точці m If a < 0 Then i1 = i a1 = -a m1 = m Exit For End If Next i m0 = m1 - step a = flag * (m0 - Bi * J0ToJ1(m0)) s = 0 Do X = (a * m1 + a1 * m0) / (a + a1) y = flag * (X - Bi * J0ToJ1(X)) s = s + 1 If y > 0 Then a = y m0 = X ElseIf y < 0 Then a1 = -y m1 = X End If Loop While Abs(y) > 0.0001 mForCylFromBi = X End Function </pre>	
--	--

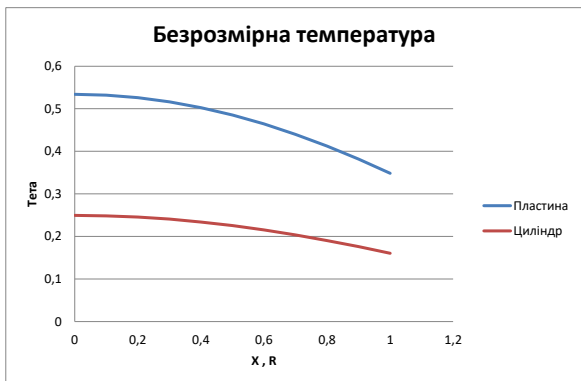
1.9 Завдання 8. Аналіз зміни температури в пластині і циліндрі

Провести аналіз зміни температури за товщиною пластини і вздовж радіусу циліндра за однакових значень визначальних критеріїв.

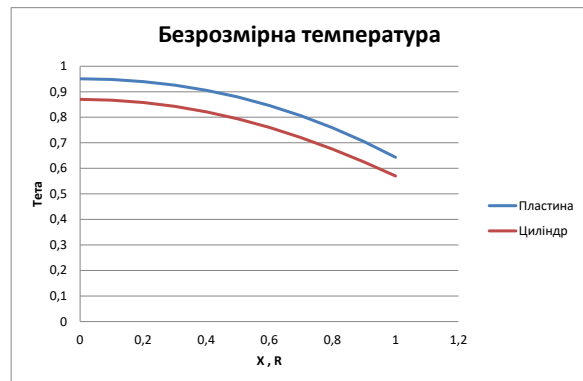
Таблиця 11 – Вихідні дані

Bi	Fo	X, R
1	0,1	1
1	0,5	1
1	1	1
1	10	0
1	0,1	0
1	0,5	0
1	1	0
1	10	0
50	0,1	1
50	0,5	1
50	1	1
50	10	0
50	0,1	0
50	0,5	0
50	1	0
50	10	0

Для аналізу застосувати створені функції зміни у часі температури у пластині і циліндрі. Приклад такого аналізу наведено на рисунках нижче.



Bi=1, Fo=2



Bi=1, Fo=0,2

Рисунок 13 –Зміна безрозмірної температури у часі для пластини і циліндру

1.10 Завдання 9. Охолодження тіл кінцевих розмірів

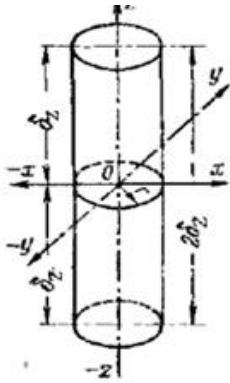


Рисунок 14 – До охолодженні циліндру кінцевої довжини

Для охолодження тіл класичної форми кінцевих розмірів використовують принцип суперпозиції, тобто добуток рішень.

Так для циліндра кінцевих розмірів маємо добуток рішення для пластини і циліндра

$$\theta = \theta_z \theta_r = \frac{T(Z, \tau) - T_p}{T_0 - T_p} \cdot \frac{T(R, \tau) - T_p}{T_0 - T_p}$$

$$\theta = F_z \left(\frac{z}{\delta_z}, \frac{\alpha \delta_z}{\lambda}, \frac{a\tau}{\delta_z^2} \right) \cdot F_r \left(\frac{z}{r_0}, \frac{\alpha r_0}{\lambda}, \frac{a\tau}{r_0^2} \right)$$

Завдання – запрограмувати функцію розрахунку нестационарної температури циліндра кінцевих розмірів. **Знайти** час нагріву центра циліндра до температури 804 °С, якщо застосовувати функцію для нескінченного циліндру, та циліндру кінцевої довжини.

Вихідними даними є розмірні величини.

Таблиця 12 – Вихідні дані:

Температуропровідність, m ² /c	<i>a</i>	6,11E-06
Тепловіддача, Вт/м ² К	<i>a</i>	140
Теплопровідність, Вт/м К	<i>λ</i>	21
Половина висоти циліндра, м	<i>δ</i>	0,1
Радіус циліндра, м	<i>r</i> ₀	0,06
Координати розрахункової точки, м	<i>r, z</i>	<i>R=0, X=0</i>
Початкова температура, С	<i>T</i> ₀	20
Температура у печі, С	<i>T</i> _п	820

Зміст

1	Лінійна інтерполяція.....	4
1.1	Теорія.....	4
1.2	Завдання 2. Двопараметрична інтерполяція.....	7
1.3	Завдання 3. Гідравлічний опір круглого каналу.....	9
1.4	Завдання 4. Швидкість в каналі.....	11
1.5	Завдання 5. Одиниці виміру температури.....	12
1.6	Завдання 6. Нагрів та охолодження нескінченної пластини.....	13
1.7	Пошук коренів характеристичного рівняння (5).....	14
1.7.1	Метод простої ітерації.....	14
1.7.2	Метод сікучої.....	14
1.8	Завдання 7. Розрахунок нагріву та охолодження нескінченного циліндра.....	18
1.9	Завдання 8. Аналіз зміни температури в пластині і циліндрі....	23
1.10	Завдання 9. Охолодження тіл кінцевих розмірів.....	24

Навчальне видання

Методичні вказівки до курсу лекцій
з навчальної дисципліни «Тепловий стан елементів енергетичного
обладнання. Окрема глава «Створення функцій користувача Excel».
Практичні приклади.»
для студентів за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

Укладачі:

ТАРАСОВ Олександр Іванович
МИХАЙЛОВА Ірина Олександрівна

Відповідальний за випуск

ст.н.с. О. П. Усатий

Роботу до видання рекомендував

доцент Л. І. Тютюнник.

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 79

Підп. до друку 2024 Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 0,5

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія