

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет "Запорізька політехніка"**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до лабораторних робіт**  
**з дисципліни**

**“Тепломасообмін в радіоелектронних апаратах”**

для студентів спеціальності  
172 «Електронні комунікації та радіотехніка» (освітні програми  
«Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні  
технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм  
навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Тепломасообмін в радіоелектронних апаратах" для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад. : Ірина ПОСПЕСВА, Наталія ФУРМАНОВА, Вадим ЯКОВЕНКО, – Запоріжжя: НУЗП, 2024. – 43 с.

Укладачі: Ірина ПОСПЕСВА, ст. викл. каф. ІТЕЗ;  
Наталія ФУРМАНОВА, к.т.н., доц. каф. ІТЕЗ;  
Вадим ЯКОВЕНКО, д.т.н., проф. каф. ІТЕЗ.

Рецензент: Тетяна БУГРОВА, к.т.н., доц. каф. РТТ

Відповідальний за випуск: Олександр МАЛИЙ, к.т.н., доц., зав.  
каф. ІТЕЗ

Затверджено  
на засіданні кафедри ІТЕЗ  
протокол № 2 від 25.10.24 р.

Рекомендовано до видання  
НМК ФІБЕК  
протокол № 4 від 15.11.24 р.

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	4
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВУЗЛА .....	5
1.1 Завдання та порядок виконання роботи.....	5
1.2 Вихідні дані для розрахунків .....	7
1.3 Зміст звіту .....	10
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КОРПУСУ ЕЛЕКТРОННОГО АПАРАТА .....	11
2.1 Короткі теоретичні відомості.....	11
2.1.1 Механізми охолодження корпусу електронного апарата.....	11
2.1.2 Визначення конвективного коефіцієнта тепловіддачі за допомогою критеріального рівняння .....	13
2.1.3 Визначальні параметри .....	16
2.1.4 Вільна конвекція в необмеженому просторі.....	17
2.1.5 Примусова конвекція в необмеженому просторі .....	18
2.1.6 Загальний тепловий потік, що відводиться від корпусу електронного апарата.....	20
2.2 Завдання до роботи .....	21
2.3 Вихідні дані до роботи.....	21
2.4 Послідовність виконання роботи.....	23
2.4.1 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при вільній конвекції у необмеженому просторі .....	23
2.4.2 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при примусовій конвекції .....	27
2.5 Зміст звіту .....	31
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ .....	32
3.1 Завдання та порядок виконання роботи.....	32
3.2 Вихідні дані до розрахунків .....	36
3.3 Зміст звіту .....	37
ЛІТЕРАТУРА .....	38
Додаток А Граничні температури середовища.....	39
Додаток Б Значення теплопровідності матеріалів .....	40
Додаток В Коефіцієнти чорноти поверхонь .....	41
Додаток Г Теплофізичні параметри середовищ.....	42

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

*Загальна мета лабораторних робіт:* вивчити механізми передачі тепла, ознайомитись з конструктивними рішеннями, що забезпечують нормальний тепловий режим конструкцій РЕЗ та їх окремих компонентів, засвоїти методики розрахунків теплових режимів.

Перед початком виконання кожної лабораторної роботи студент повинен ознайомитись з теоретичними відомостями до роботи.

Засвоєні методики можуть бути використані при виконанні конструкторських розрахунків в курсовому та дипломному проектуванні.

Для розрахунків рекомендується застосувати математичний пакет Mathcad або електронні таблиці Excel.

Для отримання заліку з роботи кожен студент пред'являє викладачеві звіт, оформлений згідно з вимогами, приведеними в методичних вказівках до роботи, і проходить співбесіду з викладачем.

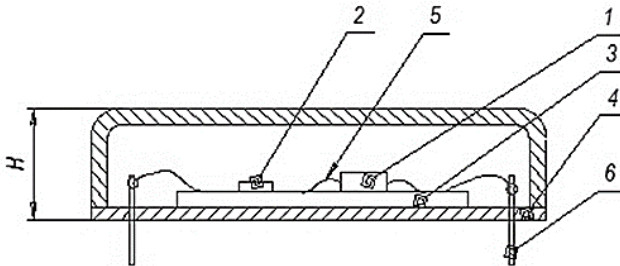
## 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВУЗЛА

**Мета роботи:** ознайомитись з методами спрощення теплових моделей функціональних вузлів РЕЗ, побудованих з урахуванням електротеплової аналогії, та отримати практичні навички теплових розрахунків елементів.

При виконанні роботи слід користуватися теоретичним матеріалом, наведеним у конспекті лекцій, част. 1, стор. 43 – 62, а також рекомендованій літературі.

### 1.1 Завдання та порядок виконання роботи

1.1.1 Для заданого функціонального вузла (див. рис. 1.1) скласти теплову модель.



1 – транзистор (р-n перехід); 2 – резистивний шар; 3 – підкладка; 4 – корпус; 5 – виводи транзистора ( $n_5 = 3$ ); 6 – виводи мікрозбірки ( $n_6$ )

Рисунок 1.1 – Конструкція функціонального вузла

При цьому використовувати принципи спрощення та електротеплову аналогію.

При складанні теплової схеми враховувати наступні допущення:

- перехідними опорами р-n перехід-підкладка, резистивний шар-підкладка та підкладка-основа корпусу знехтувати;
- р-n перехід, резистивний шар, підкладку та основу корпусу вважати плоскими стінками;
- виводи транзистора вважати закороченими стрижнями;
- виводи мікрозбірки вважати теплоізовльованими стрижнями.

1.1.2 Розрахувати теплові опори, які входять у теплову модель.

1.1.2.1 Для зовнішньої (верхньої та бокової) поверхні корпусу тепловий опір визначити за формулою:

$$R_T = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (1.1)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К), включає до себе конвективну та променеву складові:  $\alpha = \alpha_K + \alpha_B$ ;

$A$  – площа контакту поверхні з навколишнім середовищем, м<sup>2</sup>.

1.1.2.2 Для плоских стінок тепловий опір визначити за формулою:

$$R_T = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad (1.2)$$

де:  $l$  – довжина теплового шляху, м;

$\lambda$  – теплопровідність матеріалу Вт/(м·К);

$A$  – площа поперечного перетину стінки, м<sup>2</sup>.

1.1.2.3 Для виводів транзистора тепловий опір визначити за формулою:

$$R_T = \frac{th(m \cdot l)}{S \cdot \lambda \cdot m} \quad (1.3)$$

$$th(ml) = \frac{e^{ml} - e^{-ml}}{e^{ml} + e^{-ml}}$$

1.1.2.4 Для виводів мікрозбірки тепловий опір визначити за формулою:

$$R_T = \frac{1}{S \cdot \lambda \cdot m} \cdot \frac{1}{th(m \cdot l)} \quad (1.4)$$

Коефіцієнт  $m$  розрахувати за формулою:

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot S}}, 1/\text{м} \quad (1.5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від торцевої поверхні стрижня, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$U$  – периметр перерізу стрижня, м.

**Примітка.** При розрахунку теплових опорів підкладки для р-п переходу і резистивного шару площу перерізу розраховувати за розмірами відповідних шарів; при розрахунку теплового опору основи корпусу площу перерізу розраховувати за розмірами основи корпусу.

1.1.3 Скласти рівняння для розрахунку сумарних теплових опорів окремо р-п переходу та резистивного шару для та розрахувати його чисельні значення.

1.1.4 Розрахувати перегрів та температури для р-п переходу та резистивного шару і порівняти їх із припустимими. При цьому за температуру зовнішнього середовища  $t_c$  прийняти максимальну температуру, що відповідає заданим умовам експлуатації (див. додаток А).

1.1.5 Зробити висновок про забезпечення теплового режиму функціонального вузла.

## 1.2 Вихідні дані для розрахунків

Вихідні дані для розрахунків вибирати згідно з варіантом з табл. 1.1 – 1.3. Позначення у табл. 1.1 – 1.3:

–  $P_1$ ,  $P_2$  – потужності, які виділяються у р-п переході та резистивному шарі відповідно;

–  $[t_1]$ ,  $[t_2]$  – допустимі температури р-п переходу та резистивного шару відповідно;

–  $h_1$  – товщина р-п переходу;

–  $h_2$  – товщина резистивного шару;

–  $h_3$  – товщина підкладки;

–  $h_4$  – товщина основи корпусу;

–  $A_1$  – площа р-п переходу,  $A_1 = L_1 \cdot B_1$ ;

–  $A_2$  – площа резистивного шару,  $A_2 = L_2 \cdot B_2$ ;

–  $A_3$  – площа підкладки;

–  $A_4$  – площа основи корпусу,  $A_4 = L_4 \cdot B_4$ ;

–  $H$  – висота корпусу;

–  $\alpha_4$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінок корпусу у навколишнє середовище;

–  $\alpha_5$  – коефіцієнт тепловіддачі від виводу транзистора у навколишнє середовище;

–  $\alpha_6$  – коефіцієнт тепловіддачі від виводу мікрозбірки у навколишнє середовище;

–  $d_5, d_6$  – діаметр виводу відповідно транзистора та мікрозбірки;

–  $l_5, l_6$  – довжина виводу відповідно транзистора та мікрозбірки;

–  $n_5, n_6$  – кількість виводів відповідно транзистора та мікрозбірки;  $n_5 = 3$ .

Значення теплопровідностей матеріалів приведені у додатку Б.

Таблиця 1.1– Параметри транзистора

Вар	Клім вик.	Транзистор						Виводи транзистора			
		$P_1$ , Вт	$[t_1]$ , °C	$h_1$ , мм	$L_1$ , мм	$B_1$ , мм	матеріал	$d_5$ , мм	$l_5$ , мм	матеріал	$\alpha_5$ , Вт/м <sup>2</sup> К
1	NU	0,60	130	0,5	0,7	0,7	Si	0,03	3,0	Au	7,6
2	W	0,20	80	0,6	1,0	0,8	Ge	0,04	4,0	Ag	5,4
3	NF	0,60	145	1,6	0,8	0,5	Si	0,05	3,5	Au	6,8
4	TH	0,80	150	1,0	0,5	0,3	Si	0,05	5,5	Ag	7,8
5	TA	0,80	75	1,2	0,9	0,8	Ge	0,04	5,0	Au	8,2
6	M	0,60	140	0,6	0,8	0,8	Si	0,03	4,5	Ag	5,6
7	U	0,36	85	1,6	1,2	0,7	Ge	0,04	6,0	Au	6,4
8	N	0,90	150	0,8	1,0	0,6	Si	0,03	5,5	Ag	5,0
9	NF	0,25	80	0,8	0,8	0,6	Ge	0,05	6,5	Au	6,6
10	T	0,55	85	1,3	1,2	1,0	Ge	0,04	4,5	Ag	8,0
11	TH	0,45	135	0,5	0,8	0,5	Si	0,05	3,5	Au	7,2
12	W	0,30	85	1,5	1,2	1,0	Ge	0,03	3,0	Ag	6,7
13	NF	0,75	145	1,4	0,9	0,5	Si	0,05	4,0	Au	5,9
14	U	1,00	135	0,8	0,6	0,5	Si	0,03	4,5	Ag	8,4
15	N	0,80	125	0,9	0,6	0,6	Si	0,04	5,5	Au	6,1
16	W	0,60	130	0,6	0,7	0,5	Si	0,03	5,0	Ag	5,7
17	NF	0,36	80	1,6	1,2	0,9	Ge	0,05	6,0	Au	8,8
18	B 1.1	0,40	130	1,2	0,6	0,6	Si	0,04	3,5	Ag	6,3
19	TM	0,25	75	0,8	0,7	0,7	Ge	0,04	4,5	Au	5,1
20	U	0,65	140	1,2	0,8	0,8	Si	0,03	5,0	Ag	6,0

Таблиця 1.2 – Параметри резистора та підкладки

Вар	Резистивний шар						Підкладка	
	$P_2$ , Вт	$[t_2]$ , °C	$h_2$ , мм	$L_2$ , мм	$B_2$ , мм	матеріал	$h_3$ , мм	матеріал
1	1,20	180	0,10	0,5	0,5	PC5006	0,6	полікор
2	0,50	200	0,15	0,6	0,4	PC5402	1,0	22XC
3	0,50	175	0,10	0,7	0,3	PC3710	1,6	полікор
4	0,70	155	0,12	0,6	0,1	PC4800	0,6	BeO
5	1,20	175	0,15	0,3	0,3	PC5006	1,0	MgO
6	0,70	225	0,13	0,8	0,5	PC5402	1,6	22XC
7	0,70	195	0,06	0,4	0,4	PC3710	0,6	полікор
8	0,45	170	0,15	0,9	0,3	PC4800	1,0	22XC
9	1,20	150	0,11	0,6	0,3	PC5006	1,6	BeO
10	0,85	155	0,12	0,4	0,4	PC5402	0,6	MgO
11	0,25	150	0,14	0,8	0,2	PC3710	1,0	22XC
12	0,65	170	0,13	0,6	0,6	PC4800	1,6	полікор
13	0,75	225	0,10	0,7	0,4	PC5006	0,6	22XC
14	0,85	215	0,08	0,6	0,6	PC5402	1,0	BeO
15	0,50	180	0,09	0,4	0,1	PC3710	1,6	MgO
16	0,75	165	0,15	0,5	0,5	PC4800	0,6	22XC
17	0,50	210	0,12	0,6	0,2	PC5006	1,0	полікор
18	0,70	180	0,14	0,5	0,2	PC5402	1,6	BeO
19	0,95	155	0,10	0,8	0,7	PC3710	0,6	MgO
20	0,80	180	0,08	0,6	0,6	PC4800	1,0	22XC

Таблиця 1.3 – Параметри корпусу та виводів

Вар	Корпус					Виводи мікрозбірки					
	$h_4$ , мм	$H$ , мм	$L_4 \cdot B_4$ , мм		матеріал	$\alpha_4$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$d_6$ , мм	$l_6$ , мм	$n_6$	матеріал	$\alpha_6$ , Вт/м <sup>2</sup> К
1	1,0	5,0	12,0	19,5	Al	28,6	0,1	10	14	Al	8,4
2	0,8	7,5	14,5	19,5	ковар	17,4	0,2	15	10	ковар	9,2
3	1,2	5,0	19,5	22,0	Al	10,2	0,1	10	16	Al	7,9
4	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	12,6	0,2	15	24	ковар	8,8
5	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	11,2	0,1	10	14	Al	7,7
6	0,8	7,5	14,5	19,5	ковар	15,6	0,2	15	16	ковар	8,1
7	1,2	5,0	19,5	22,0	Al	12,4	0,1	10	14	Al	9,3
8	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	10,8	0,2	15	10	ковар	7,6
9	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	22,6	0,1	10	24	Al	8,2
10	0,8	7,5	12,0	19,5	ковар	11,1	0,2	15	36	ковар	8,9
11	1,2	5,0	19,5	22,0	Al	15,8	0,1	15	14	Al	9,9
12	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	30,4	0,2	10	16	ковар	7,3
13	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	20,7	0,1	15	10	Al	8,5
14	0,8	7,5	12,0	19,5	ковар	22,6	0,2	10	24	ковар	9,1
15	1,2	5,0	14,5	19,5	Al	31,2	0,1	15	32	Al	7,2
16	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	20,4	0,2	10	14	ковар	7,5
17	1,0	5,0	7,0	14,5	Al	12,0	0,1	15	10	Al	8,4
18	0,8	7,5	7,0	14,5	ковар	18,5	0,2	10	14	ковар	9,7
19	1,2	5,0	14,5	19,5	Al	31,3	0,1	15	16	Al	7,1
20	0,6	7,5	19,5	29,5	ковар	10,9	0,2	10	10	ковар	9,0

### 1.3 Зміст звіту

1.3.1 Мета роботи та вихідні дані для розрахунків.

1.3.2 Ескіз функціонального вузла.

1.3.3 Теплова модель функціонального вузла.

1.3.4 Розрахунки теплових опорів елементів теплової моделі.

1.3.5 Розрахунки еквівалентних теплових опорів р-п переходу та резистивного шару.

1.3.6 Розрахунки перегрівів та температур р-п переходу та резистивного шару.

1.3.7 Висновки.

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КОРПУСУ ЕЛЕКТРОННОГО АПАРАТА

**Мета роботи:** дослідження впливу матеріалу та швидкості руху теплоносія на тепловий режим корпусу електронного апарата.

При виконанні роботи слід користуватися теоретичним матеріалом, наведеним у конспектах лекцій, част. 1, 2, а також рекомендованій літературі.

### 2.1 Короткі теоретичні відомості

#### 2.1.1 Механізми охолодження корпусу електронного апарата

Тепловий потік від корпусу електронного апарата відводиться за рахунок усіх трьох механізмів теплообміну: кондуктивного, конвективного та радіаційного. При цьому, конвекція теплоти завжди відбувається спільно з кондукцією (переносом теплоти за рахунок теплопровідності), оскільки макрооб'єми текучого середовища складаються з мікрочастинок речовини, а сам процес відбувається у нерівномірному в просторі температурному полі. Цей вид переносу теплоти називається конвективним теплообміном.

Передача тепла **теплопровідністю** відбувається переважно в твердих тілах і описується **законом Фур'є**, який в інтегральній формі має вигляд:

$$P_T = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot A = \frac{\Delta t}{R_T} = G_T \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

де  $P_T$  – тепловий потік (потужність), який передається за рахунок теплопровідності, Вт;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$\Delta t = t_1 - t_2$  – перепад температур між частинами твердого тіла з температурами  $t_1$  і  $t_2$ , °С;

$A$  – площа поперечного перерізу твердого тіла, через який проходить тепловий потік, м<sup>2</sup>;

$R_T$  – тепловий опір тепловідводу, К/Вт;

$G_T$  – теплова провідність тепловідводу, Вт/К.

Значення  $R_T$  та  $G_T$  можна визначити за формулою:

$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{\Delta x}{\lambda \cdot A} \quad (2.2)$$

де  $\Delta x$  – довжина теплового шляху, м.

Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  залежить від різних властивостей матеріалу твердого тіла.

Передача тепла **випромінюванням** відбувається через прозори для теплових променів середовища.

Процеси теплообміну випромінюванням описуються **законом Стефана-Больцмана**, який в інтегральній формі набуває вигляду:

$$P_B = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot A_{1,2} \quad (2.3)$$

де  $P_B$  – тепловий потік (потужність), який передається за рахунок випромінювання, Вт;

$\sigma_0$  – стала Стефана-Больцмана,  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\varepsilon_{1,2}$  – зведений коефіцієнт чорноти поверхонь двох тіл, між якими відбувається теплообмін випромінюванням;

$T_1, T_2$  – абсолютна температура поверхонь двох тіл, К;

$A_{1,2}$  – взаємна поверхня теплообміну випромінюванням двох тіл, м<sup>2</sup>.

Запишемо закон Стефана-Больцмана в більш зручній формі:

$$P_B = \alpha_B \cdot \Delta t \cdot A_{1,2} = \frac{\Delta t}{R_B} = G_B \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

де  $\alpha_B$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням;

$\Delta t = t_1 - t_2$  – перепад температур між двома тілами, °С;

$R_B$  – тепловий опір теплопередачі випромінюванням, К/Вт;

$G_B$  – тепла провідність теплопередачі випромінюванням, Вт/К.

Значення  $R_B$  та  $G_B$  можна визначити за формулою:

$$R_B = \frac{1}{G_B} = \frac{1}{\alpha_B \cdot A_{1,2}} \quad (2.5)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням обчислюється за формулою:

$$\alpha_B = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{1,2} \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Коефіцієнт чорноти тіл  $\varepsilon_{1,2}$  залежить від матеріалу і властивостей поверхні теплообміну.

Значення коефіцієнта чорноти для різних поверхонь наведене у додатку В.

**Конвективний теплообмін** відбувається між поверхнею твердих тіл і теплоносієм (газ, рідина), частинки якого можуть переміщуватися в процесі теплообміну. Процеси конвекції описуються **законом Ньютона-Ріхмана**, який в інтегральній формі має вигляд:

$$P_K = \alpha_K \cdot \Delta t \cdot A = \frac{\Delta t}{R_K} = G_K \cdot \Delta t \quad (2.7)$$

де  $P_K$  – тепловий потік (потужність), який передається за рахунок конвективного теплообміну, Вт;

$\alpha_K$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі;

$\Delta t = t - t_C$  – різниця температур між поверхнею твердого тіла з температурою  $t$  і теплоносієм з температурою  $t_C$ , °С;

$A$  – площа поверхні твердого тіла;

$R_K$  – тепловий опір при конвективному теплообміні, К/Вт;

$G_K$  – теплова провідність при конвективному теплообміні, Вт/К.

Значення  $R_K$  та  $G_K$  можна визначити за формулою:

$$R_K = \frac{1}{G_K} = \frac{1}{\alpha_K \cdot A} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 Визначення конвективного коефіцієнта тепловіддачі за допомогою критеріального рівняння

При розрахунках теплових режимів найбільш складною задачею є визначення конвективного коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_K$ , оскільки при цьому слід враховувати не тільки процес відведення теплоти рухомим теплоносієм, але й передачу теплоти у приграничному шарі теплоносія поблизу охолоджуваної поверхні за рахунок теплопровідності. У зв'язку з цим конвективний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_K$  є складеною величиною, яка залежить від великої кількості чинників: температур охолоджуваної поверхні  $t$  та теплоносія  $t_C$ , коефіцієнта термічного розширення теплоносія  $\beta$ , його теплопровідності  $\lambda$ , теплоємності  $c_p$ , густини  $\rho$ , динамічної  $\mu$  або кінематичної  $\nu$  в'язкості, а також швидкості руху теплоносія  $w$ , геометричних розмірів охолоджуваної поверхні та її орієнтації у

просторі. Окрім цих параметрів слід також враховувати прискорення сили тяжіння  $g$ .

Таким чином:

$$\alpha = f(t, t_c, \beta, \lambda, c_p, \mu, \rho, w, x, g \dots) \quad (2.9)$$

Отримання такого роду експериментальних залежностей є практично нереальною задачею через велику кількість параметрів, від яких залежить процес. Однак поодинокі експерименти дозволяють узагальнити велику кількість випадків на основі теорії подоби. Наприклад, на теплообмін при вільній конвекції суттєво впливає близько десяти фізичних величин. Якщо на основі теорії подоби поєднати фізичні та геометричні параметри у безрозмірні комплекси, той же процес можна описати не десятками, а наступними трьома комплексами: числом Нуссельта  $Nu$ , числом Грасгофа  $Gr$  та числом Прандтля  $Pr$ . Тоді залежність (2.9) можна представити у вигляді безрозмірного рівняння, що пов'язує усі три числа подоби:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.10)$$

Це рівняння являє собою **критеріальне рівняння** (рівняння подоби) для конвективного теплообміну.

**Число (критерій) Нуссельта** характеризує інтенсивність передачі теплоти конвекцією відносно інтенсивності передачі теплоти теплопровідністю в шарі товщиною  $l$  на межі рідина-стінка. Його можна визначити за формулою:

$$Nu = \frac{\alpha_K \cdot l}{\lambda} \quad (2.11)$$

де  $\alpha_K$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $l$  – визначальний розмір поверхні, від якої відводиться теплота, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/(м·К).

Коефіцієнт теплопровідності є теплофізичною характеристикою матеріалу теплоносія. Його значення в залежності від визначальної температури теплоносія визначається за довідниками.

**Число (критерій) Прандтля** є мірою подоби температурних та швидкісних полів у потоці рідини та визначається за формулою:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2.12)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість теплоносія,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності теплоносія,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Кінематична в'язкість, коефіцієнт температуропровідності та число Прандтля є теплофізичними характеристиками матеріалу теплоносія. Їхні значення в залежності від визначальної температури теплоносія визначаються за довідниками.

**Число (критерій) Грасгофа** характеризує вільну конвекцію і являє собою співвідношення між підйомними силами, що виникають у рідині при нагріванні за рахунок різниці густини, і силами в'язкості. Його можна визначити за формулою:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \quad (2.13)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\beta$  – коефіцієнта термічного розширення теплоносія,  $1/\text{К}$ ;

$\Delta t = t - t_c$  – різниця температур між поверхнею твердого тіла з температурою  $t$  і теплоносієм з температурою  $t_c$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт термічного розширення є теплофізичною характеристикою матеріалу теплоносія. Для рідин його значення в залежності від визначальної температури визначається за довідниками. Для газів (у тому числі і для повітря) значення  $\beta$  можна визначити за формулою:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (2.14)$$

де  $T$  – визначальна температура теплоносія за шкалою Кельвіна,  $\text{К}$ .

Теплофізичні характеристики для повітря в діапазоні температур від  $-50^\circ\text{C}$  до  $+120^\circ\text{C}$  наведені у табл. Г.1 додатку Г, для води в діапазоні температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $+150^\circ\text{C}$  – у табл. Г.2 додатку Г.

Таким чином, якщо визначити число Нуссельта з критеріального рівняння (2.10) для конкретних умов тепловіддачі, можна розрахувати значення конвективного коефіцієнта тепловіддачі з формули (2.11):

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (2.15)$$

## 2.1.3 Визначальні параметри

### 2.1.3.1 Визначальна температура

Числа подоби включають параметри, суттєво залежні від температури:  $\nu$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  і т. ін.

За умови конвекції відбувається зміна температури рідини від температури стінки  $t_w$  до температури середовища  $t_c$  в області, віддаленій від стінки, а в деяких випадках температура теплоносія змінюється не лише за площиною поперечного перерізу, але й за довжиною потоку від величини  $t_1$  на вході до  $t_2$  на виході з системи. Тому в технічних розрахунках прийнято обирати значення параметрів при деякому усередненому значенні температури, яке має назву **визначальної температури**.

В процесях з вільною конвекцією в якості **визначальної температури**  $t_m$  часто використовується середньоарифметичне значення:

$$t_m = \frac{t_w + t_c}{2} \quad (2.16)$$

За умови примусової конвекції проводиться розрахунок визначальної температури як за перерізом (усереднення за площею поперечного перерізу, усереднення за об'ємними витратами), так і за довжиною. Якщо деяку усереднену за поперечним перерізом температуру на вході потоку позначити  $t_{cep}'$ , а на виході  $t_{cep}''$ , то **визначальною температурою**  $t_c$  є середньоарифметичне значення температури за довжиною:

$$t_{cep} = \frac{t_{cep}' + t_{cep}''}{2} \quad (2.17)$$

### 2.1.3.2 Визначальний розмір

**Визначальний розмір** залежить від геометричних розмірів та форми тіла, вздовж якого рухається потік.

Як вказувалося раніше, коефіцієнт конвективної тепловіддачі повинен залежати від геометричних параметрів тіла, при чому при аналізі різних випадків теплообміну кількість геометричних параметрів, які суттєво впливають на процес, може змінюватися. Однак навіть у найпростіших випадках, коли ця кількість невелика (один, два), виникають труднощі з вибором саме тих параметрів, які найбільш впливають на процес.

Наприклад, для *круглої труби*, якою протікає рідина, буде природним обрати в якості *визначального розміру* діаметр труби  $d$ .

Для *каналів складного перерізу* (прямокутного, неправильного перерізу і т. ін.) *визначальним розміром* є еквівалентний діаметр:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot S}{U} \quad (2.18)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу каналу, м<sup>2</sup>;

$U$  – повний периметр перерізу незалежно від того, яка частина цього периметру приймає участь в теплообміні, м.

При *обтіканні пластини* у якості *визначального розміру* обирається довжина пластини за напрямком руху.

Для дослідження теплообміну в більш складних геометричних системах в критеріальне рівняння зазвичай вводять відношення:

$$\frac{L_1}{L_0}, \frac{L_2}{L_0}, \dots \quad (2.19)$$

де  $L_0$  – визначальний розмір системи, м;

$L_1, L_2, \dots$  – довжина тіла, шорсткість і т. ін.

#### 2.1.4 Вільна конвекція в необмеженому просторі

При *вільній конвекції в необмеженому просторі* для обчислення коефіцієнту тепловіддачі конвекцією використовується критеріальне рівняння:

$$Nu_m = C \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n = C \cdot Ra_m^n \quad (2.20)$$

де  $C$  та  $n$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від режиму руху теплоносія, що в свою чергу визначається співвідношенням  $(Gr \cdot Pr) = Ra$ ; їхні значення наведені у табл. 2.1;

$m$  – індекс, який позначає, що значення фізичних параметрів для обчислення чисел Нуссельта, Грасгофа, Прандтля та Релея слід обчислювати для визначальної (середньої) температури відповідно до формули 2.1.

Таблиця 2.1 – Емпіричні коефіцієнти критеріального рівняння вільної конвекції

$(Gr \cdot Pr)_m = Ra_m$	$C$	$n$	Режим руху
$1 \cdot 10^{-3}$	0,50	0	Плівковий
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	$1/8$	Перехідний
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	$1/4$	Ламінарний
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0,135	$1/3$	Турбулентний

При визначення конвективного коефіцієнта тепловіддачі слід користуватися формулою (2.15) з урахуванням визначального розміру  $l$  та коефіцієнта орієнтації поверхні  $N$ :

$$\alpha_k = N \cdot \frac{Nu_m \cdot \lambda_m}{l} \quad (2.21)$$

Визначальні розміри та коефіцієнти орієнтації для найбільш розповсюджених поверхонь наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Визначальний розмір та коефіцієнт орієнтації поверхонь різних форм

Поверхня	Визначальний розмір	$N$
Кулі, горизонтальні циліндри	діаметр	1,0
Вертикальні пластини й циліндри	висота	1,0
Горизонтальні пластини, що розсіюють потоки: – догори – донизу	максимальний розмір пластини	1,3 0,7

### 2.1.5 Примусова конвекція в необмеженому просторі

При примусовій конвекції в необмеженому просторі вид критеріального рівняння залежить від режиму руху теплоносія, який визначається в залежності від значення числа Рейнольдса.

**Число (критерій) Рейнольдса** характеризує гідродинамічний режим потоку, будучи мірою відношення сил інерції та сил в'язкого тертя:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (2.22)$$

де  $w$  – швидкість теплоносія, м/с;  
 $l$  – визначальний розмір, м.

За умови *ламінарного руху* рідини (при  $Re < 5 \cdot 10^5$ ) критеріальне рівняння для середнього коефіцієнта тепловіддачі має вигляд:

$$Nu_f = 0,66 \cdot Re_f^{0,50} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} \quad (2.23)$$

За визначальну температуру приймається температура потоку, що набігає  $t_f$ , за визначальний розмір – довжина тепловіддаючої стінки у напрямку потоку.

Вплив фізичних властивостей рідини та їхні залежності від температури враховуються параметром  $Pr_f^{0,43}$ , а вплив напрямку теплового потоку (від рідини до стінки або навпаки) і рід рідини – параметром  $\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}$ .

Для повітря в широкому інтервалі температур (від  $0^\circ\text{C}$  до  $1000^\circ\text{C}$ ) можна вважати, що  $Pr_f = Pr_w = 0,70$ , тоді  $\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} = 1$ , а  $Pr_f^{0,43} \approx 0,86$ , і формула (8.12) набуває простого вигляду:

$$Nu_f \approx 0,57 \cdot \sqrt{Re_f} \quad (2.24)$$

При значеннях  $Re \geq 5 \cdot 10^5$  виникає *турбулентний рух* і критеріальне рівняння для середнього коефіцієнта тепловіддачі приймає вигляд:

$$Nu_f = 0,037 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^3 \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} \quad (2.25)$$

Визначальні температура та розмір тут такі самі, як і у попередньому випадку.

Для повітря формула (2.24) приймає спрощений вигляд:

$$Nu_f \approx 0,032 \cdot Re_f^{0,8} \quad (2.26)$$

### 2.1.6 Загальний тепловий потік, що відводиться від корпусу електронного апарата

Нехтуючи кондуктивним теплообміном, вважатимемо, що тепловий потік від  $i$ -ої поверхні корпусу відводиться за допомогою конвективного теплообміну та випромінювання.

Загальний тепловий потік від  $i$ -ої поверхні:

$$P_i = P_{Ki} + P_{Bi} = (G_{Ki} + G_{Bi}) \cdot \Delta t_i = G_i \cdot \Delta t_i = \alpha_i \cdot A_i \cdot \Delta t_i \quad (2.27)$$

де  $\alpha_i$  – загальний коефіцієнт тепловіддачі від  $i$ -ої поверхні корпусу, Вт/(м<sup>2</sup>·К), розраховується за формулою (2.27);

$G_i$  – теплова провідність від  $i$ -ої поверхні корпусу, Вт/К;

$\Delta t_i$  – перегрів  $i$ -ої поверхні, °С.

$$\alpha_i = \alpha_{Ki} + \alpha_{Bi} \quad (2.28)$$

Якщо корпус має форму паралелепіпеда, то загальний тепловий потік, що відводиться від верхньої (*top*)  $A_t$ , нижньої (*bottom*)  $A_b$ , та бокової (*side*)  $A_s$  поверхонь корпусу:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i \cdot \Delta t_i \quad (2.29)$$

де  $n$  – кількість поверхонь, для яких окремо обчислюється коефіцієнт тепловіддачі.

При однакових температурах усіх поверхонь (2.28) набуває вигляду:

$$P = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i = \alpha \cdot A \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{R} \quad (2.30)$$

де  $A$  – загальна площа поверхні корпусу електронного апарата, м<sup>2</sup>, визначається за формулою (2.31);

$\alpha$  – середній коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К), визначається за формулою (2.32);

$R$  – тепловий опір корпусу, К/Вт, визначається за формулою (2.33).

$$A = A_t + A_b + A_s \quad (2.31)$$

$$\alpha = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i; \quad (2.32)$$

$$R = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (2.33)$$

## 2.2 Завдання до роботи

Дослідити залежність середнього коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , загального теплового потоку з поверхні корпусу  $P$  та теплового опору корпусу  $R$  від величини перегріву корпусу  $\Delta t$  за умови:

- вільної конвекції у необмеженому просторі;
- примусової конвекції у необмеженому просторі при різних значеннях швидкості потоку теплоносія.

Розрахунки проводити для **п'яти** значень температури корпусу у межах від  $t_{min} = t_c + \Delta t$  до  $t_{max}$ .

## 2.3 Вихідні дані до роботи

Корпус має форму паралелепіпеда з розмірами  $L_1 \times L_2 \times h$ , де  $h$  – висота корпусу.

Температуру зовнішнього середовища (теплоносія)  $t_c$  прийняти рівною граничній температурі  $t_{Czp}$  для заданих умов експлуатації.

Максимальну температуру корпусу  $t_{max}$  прийняти рівною:

- для **непарних варіантів**  $t_{max} = +80^\circ\text{C}$ ;
- для **парних варіантів**  $t_{max} = +100^\circ\text{C}$ .

Допустиму температуру корпусу  $[t]$  прийняти рівною:

- для **сталевих корпусів**  $t_{max} = +75^\circ\text{C}$ ;
- для корпусів з **алюмінієвих сплавів**  $t_{max} = +70^\circ\text{C}$ ;
- для **пластмасових корпусів**  $t_{max} = +65^\circ\text{C}$ .

Для усіх варіантів:

- при **вільній конвекції** матеріал теплоносія – **повітря**;
  - при **примусовій конвекції** матеріал теплоносія – **вода**;
- швидкості руху теплоносія  $w$ : 0,01 м/с; 0,05 м/с; 0,10 м/с.

Кліматичне виконання та параметри корпусу в залежності від варіанту обирати з табл. 2.3.

При розрахунках приймаються наступні припущення:

- корпус знаходиться у необмеженому просторі;
- тепловіддача теплопровідністю відсутня;
- корпус має ізометричну поверхню, тобто температура поверхонь усіх його стінок однакова ( $t_{wi} = const; i = 1 \dots n$ );

– при примусовій конвекції за температуру теплоносія прийняти граничну температуру середовища  $t_{Cp}$  для заданих умов експлуатації:  $t_f = t_C$ ;

– при примусовій конвекції рух потоку теплоносія – горизонтальний, співпадає з напрямком найбільшої сторони горизонтальних стінок корпусу  $l_1$ .

Таблиця 2.3 – Кліматичне виконання та параметри корпусу електронного апарата

№ вар	Клім. викон.	Матеріал корпусу	Покриття корпусу	$L_1 \times L_2 \times h$ , мм	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт
1	N	сталь	лак мат.	300×280×125	100	2000
2	TH	полістирол	матове	380×250×220	60	2800
3	U	полістирол	глянцева	400×225×100	75	1400
4	NF	Д16	Ан. Окс.	300×220×200	50	3600
5	M	сталь	нікель	220×200×75	20	800
6	W	полістирол	матове	325×275×160	50	2400
7	TA	полістирол	глянцева	300×200×180	20	1200
8	NF	Д16	поліроване	320×220×60	30	1800
9	N	сталь	Хім. Окс	350×210×100	120	1500
10	W	полістирол	глянцева	220×200×55	10	900
11	M	полістирол	матове	220×120×60	15	500
12	U	сталь	емаль глянец.	285×215×115	100	2000
13	NF	Д16	Ан. Окс.	355×275×150	80	2200
14	TH	сталь	нікель	250×220×200	20	2400
15	W	Д16	лак матовий	150×75×50	5	300
16	N	сталь	Хім. Окс	315×250×80	150	2100
17	M	сталь	емаль матова	280×220×70	60	1000
18	U	полістирол	матове	265×200×70	40	2000
19	NF	Д16	емаль глянец.	315×200×100	50	1300
20	W	сталь	Хім. Окс.	330×120×75	30	800

## 2.4 Послідовність виконання роботи

### 2.4.1 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при вільній конвекції у необмеженому просторі

#### 2.4.1.1 Визначення температури корпусу $t_{ki}$ в досліджуваних точках

Для заданого кліматичного виконання визначити температуру навколишнього середовища  $t_C = t_{Csp}$  (додаток А).

Розрахувати значення інтервалу зміни температури у межах від  $t_C$  до  $t_{max}$ .

$$\delta t = \frac{t_{max} - t_C}{r} \quad (2.34)$$

де  $r$  – кількість досліджуваних точок,  $r = 5$ .

Розрахувати перегріву стінок корпусу  $\Delta t_j$  та температури стінок корпусу  $t_{wj}$  в досліджуваних точках за шкалою Цельсія:

$$\Delta t_j = j \cdot \delta_j; \quad t_{wj} = t_C + \Delta t_j, \text{ } ^\circ C \quad (2.35)$$

де  $j$  – номер поточної точки,  $j = 1 \dots 5$ .

#### 2.4.1.2 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням

Розрахувати температуру середовища та температури поверхонь стінок корпусу у п'яти точках за шкалою Кельвіна:

$$T_C = t_C + 273, K; \quad T_i = t_{wj} + 273, K \quad (2.36)$$

З додатку Б вибрати значення коефіцієнта чорноти поверхні корпусу в залежності від його матеріалу та покриття.

Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням  $\alpha_{Bj}$  за формулою (2.6).

При цьому прийняти:

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon; \quad T_{1j} = T_{wj}; \quad T_2 = T_C.$$

#### 2.4.1.3 Визначення теплофізичних характеристик

Розрахувати значення визначальних температур  $t_{mj}$  за формулою (2.16).

Визначити теплофізичні параметри повітря, що відповідають визначальним температурам в досліджуваних точках:

- значення  $\lambda_{mj}$ ,  $\nu_{mj}$ ,  $Pr_{mj}$  вибрати з табл. Г.1 додатку Г;
- значення  $\beta_{mj}$  розрахувати за формулою (2.14).

Для температур, які не відповідають значенням, вказаним у табл. Г.1, теплофізичні параметри розрахувати за формулою:

$$X = X_{t1} + (X_{t2} - X_{t1}) \cdot \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \quad (2.37)$$

де  $X$  – значення теплофізичного параметра, що відповідає питомій температурі  $t$ ;

$t_1$  – найближча температура з табл. Г.1, менша за питому температуру  $t$  ( $t > t_1$ );

$t_2$  – найближча температура з табл. Г.1, більша за питому температуру  $t$  ( $t < t_2$ ).

$X_{t1}$ ,  $X_{t2}$  – значення теплофізичного параметра, що відповідають температурам  $t_1$  та  $t_2$  відповідно.

#### **2.4.1.4 Розрахунки конвективних та загальних коефіцієнтів тепловіддачі**

*Розрахунки вести окремо для верхньої  $\alpha_{Ktj}$ , нижньої  $\alpha_{Kbj}$  та бокової  $\alpha_{Ksj}$  поверхонь корпусу. Визначальний розмір  $l_i$  та коефіцієнт орієнтації у просторі  $N_i$  обирати з табл. 2.2.*

Розрахувати число Грасгофа  $Gr_{mj}$  за формулою (2.13).

Розрахувати число Релея  $Ra_{mj} = Gr_{mj} \cdot Pr_{mj}$  та визначити режим руху для кожної з досліджуваних точок.

Розрахувати число Нуссельта  $Nu_{mj}$  за формулою (2.20). Коефіцієнти  $C$  та  $n$  обирати з табл. 2.1 в залежності від режиму руху.

Розрахувати значення конвективного коефіцієнта тепловіддачі за формулою (2.21).

Розрахувати значення загального коефіцієнта тепловіддачі за формулою (2.28).

#### **2.4.1.5 Розрахунки загальної теплової потужності, середнього коефіцієнта тепловіддачі та теплового опору корпусу**

Розрахувати площі верхньої  $A_t$ , нижньої  $A_b$ , та бокових  $A_s$  поверхонь корпусу за його геометричними характеристиками в залежності від варіанта.

За формулою (2.30) розрахувати загальну теплову потужність  $P$ , що відводиться від корпусу електронного апарата.

За формулою (2.31) розрахувати загальну площу поверхні корпусу електронного апарата  $A$ .

За формулою (2.32) розрахувати середній коефіцієнт тепловіддачі від корпусу електронного апарата  $\alpha$ .

За формулою (2.33) розрахувати тепловий опір корпусу електронного апарата  $R$ .

Результати розрахунків оформити у вигляді табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Дослідження теплового режиму корпусу за умови вільної конвекції

Параметр	Досліджувані точки				
	1	2	3	4	5
$t_c, ^\circ\text{C}$					
$\Delta t_j, ^\circ\text{C}$					
$t_{wj}, ^\circ\text{C}$					
$T_c, \text{K}$					
$T_{wj}, \text{K}$					
$\alpha_{Bj}, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
$t_{mj}, ^\circ\text{C}$					
$\lambda_{mj}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$					
$\nu_{mj}, \text{м}^2/\text{с}$					
$Pr_{mj}$					
$\beta_{mj}, 1/\text{К}$					

Продовження табл. 2.4

Параметр	Досліджувані точки				
	1	2	3	4	5
<b>Верхня стінка</b>	$A_t =$		$l =$		$N =$
$Gr_{mj}$					
$Ra_{mj}$					
$C$					
$N$					
$Nu_{mj}$					
$\alpha_{ktj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
$\alpha_{tj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
<b>Нижня стінка</b>	$A_b =$		$l =$		$N =$
$Gr_{mj}$					
$Ra_{mj}$					
$C$					
$N$					
$Nu_{mj}$					
$\alpha_{kbj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
$\alpha_{bj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
<b>Бокові стінки</b>	$A_s =$		$l =$		$N =$
$Gr_{mj}$					
$Ra_{mj}$					
$C$					
$N$					
$Nu_{mj}$					
$\alpha_{ksj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
$\alpha_{sj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
<b>Загальні характеристики</b>					
$A$ , м <sup>2</sup>					
$P_j$ , Вт					
$\alpha_j$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
$R_j$ , К/Вт					

### 2.4.1.6 Графічне оформлення результатів досліджень

За результатами розрахунків побудувати графіки залежності середнього коефіцієнта тепловіддачі, загальної теплової потужності та теплового опору корпусу електронного апарата від температури поверхні корпусу  $t_w$  у межах від  $t_c$  до  $t_{max}$ :  $\alpha = f_1(t)$ ;  $P = f_2(t)$ ;  $R = f_3(t)$ .

Враховуючи, що сумарна тепла потужність, що виділяється у блоці, дорівнює  $P_1$ , визначити графічно максимальну температуру корпусу електронного апарата  $t_{Kmax}$  та порівняти з допустимою температурою  $[t]$ . Зробити висновки.

### 2.4.2 Дослідження теплового режиму корпусу електронного апарата при примусовій конвекції

Перегріву стінок корпусу  $\Delta t_j$  та температури стінок корпусу  $t_{wj}$  в досліджуваних точках за шкалою Цельсія взяти з табл. 2.4.

Оскільки при вимушеній конвекції теплоносієм є вода (середовище, не прозоре для теплових променів), коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням не розраховується.

#### 2.4.2.1 Визначення теплофізичних характеристик

З табл. Г.2 додатку Г визначити теплофізичні параметри води:

– значення  $\lambda_{fj}$ ,  $\nu_{fj}$ ,  $Pr_{fj}$ , що відповідають температурі теплоносія  $t_f$ ;

– значення  $Pr_{wj}$ , що відповідають температурам стінки у досліджуваних точках  $t_{wj}$ .

Для температур, які не відповідають значенням, вказаним у табл. Г.2, теплофізичні параметри розрахувати за формулою (2.37).

#### 2.4.2.2 Розрахунки конвективних коефіцієнтів тепловіддачі, загальної теплової потужності, середнього коефіцієнта тепловіддачі та теплового опору корпусу

1 Розрахувати сумарну площу горизонтальних (*horizontal*) поверхонь  $A_h = A_t + A_b$ , площу бокових поверхонь  $A_s$  та загальну площу корпусу  $A = A_h + A_s$  за його геометричними характеристиками в залежності від варіанта.

2 Для заданої швидкості руху теплоносія  $w_1=0,01$  м/с розрахувати число Рейнольдса  $Re$  за формулою (2.22) окремо для горизонтальних та бокових поверхонь.

За визначальний розмір прийняти:

– для горизонтальних поверхонь довжину сторони, що співпадає з напрямком потоку  $l = l_1$ ;

– для бокових поверхонь, враховуючи поперечне обтікання, суму сторін горизонтальних поверхонь  $l = l_1 + l_2$ ;

За величиною числа Рейнольдса визначити режим руху теплоносія.

3 Для кожної з досліджуваних точок розрахувати число Нуссельта  $Nu_{fj}$ :

– за умови ламінарного руху теплоносія за формулою (2.23);

– за умови турбулентного руху теплоносія за формулою (2.25).

4 Для кожної з досліджуваних точок розрахувати конвективний коефіцієнт теплообміну окремо для горизонтальних (верхньої та нижньої) та бокових стінок.

$$\alpha_{kj} = \frac{Nu_{fj} \cdot \lambda_f}{l} \quad (2.38)$$

5 За формулою (2.30) розрахувати загальну теплову потужність  $P_j$ , що відводиться від корпусу електронного апарата.

6 За формулою (2.32) розрахувати середній коефіцієнт тепловіддачі від корпусу електронного апарата  $\alpha_j$ .

7 За формулою (2.33) розрахувати тепловий опір корпусу електронного апарата  $R_j$ .

8 Повторити пункти 2) – 7) для швидкостей руху теплоносія  $w_2=0,05$  м/с;  $w_3=0,10$  м/с.

Результати розрахунків оформити у вигляді табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Дослідження теплового режиму корпусу при примусовій конвекції

Параметр	Досліджувані точки				
	1	2	3	4	5
$t_f = t_c, ^\circ\text{C}$					
$\Delta t_j, ^\circ\text{C}$					
$t_{wj}, ^\circ\text{C}$					
$\lambda_{fj}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$					
$\nu_{fj}, \text{м}^2/\text{с}$					
$Pr_{fj}$					
$Pr_{wj}$					
$A, \text{м}^2$					
$w_1 =$	<b>0,1 м/с</b>				
Гориз. поверхня	$A_h =$		$l_h =$		$Re_h =$
$Nu_{fhj}$					
$\alpha_{khj}, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
Верт. поверхня	$A_s =$		$l_s =$		$Re_s =$
$Nu_{fsj}$					
$\alpha_{ksj}, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
$P_j, \text{Вт}$					
$\alpha_j, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
$R_j, \text{К}/\text{Вт}$					
$w_2 =$	<b>0,05 м/с</b>				
Гориз. поверхня	$A_h =$		$l_h =$		$Re_h =$
$Nu_{fhj}$					
$\alpha_{khj}, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
Верт. поверхня	$A_s =$		$l_s =$		$Re_s =$
$Nu_{fsj}$					
$\alpha_{ksj}, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
$P_j, \text{Вт}$					
$\alpha_j, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$					
$R_j, \text{К}/\text{Вт}$					

Продовження табл. 2.5

Параметр	Досліджувані точки				
	1	2	3	4	5
$w_3 =$	<b>0,10 м/с</b>				
Гориз. Поверхня	$A_h =$		$l_h =$		$Re_h =$
$Nu_{fhj}$					
$\alpha_{khj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
Верг. Поверхня	$A_s =$		$l_s =$		$Re_s =$
$Nu_{fsj}$					
$\alpha_{ksj}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
$P_j$ , Вт					
$\alpha_j$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					
$R_j$ , К/Вт					

#### 2.4.2.3 Графічне оформлення результатів досліджень

За результатами розрахунків побудувати:

1) у загальній системі координат у межах від  $t_f$  до  $t_{max}$  для різних значень швидкості руху теплоносія графіки залежностей:

а) середнього коефіцієнта тепловіддачі від температури  $\alpha = f_1(t)$ ;

б) загальної теплової потужності, що відводиться від корпусу, від температури  $P = f_2(t)$ ;

в) теплового опору корпусу від температури  $R = f_3(t)$ ;

2) для значення теплової потужності  $P = P_2$  графік залежності температури корпусу від швидкості руху теплоносія  $t = f_4(w)$ ;

3) для значення допустимої температури корпусу  $t = [t]$  графік залежності теплової потужності від швидкості руху теплоносія  $P = f_5(w)$ .

Враховуючи, що сумарна тепла потужність, що виділяється у блоці, дорівнює  $P_2$ , визначити графічно максимальну температуру корпусу електронного апарата  $t_{Pmax}$  для різних значень швидкості руху теплоносія  $w$  та порівняти з допустимою температурою  $[t]$ .

## 2.5 Зміст звіту

2.5.1 Мета роботи і вихідні данні для розрахунків згідно з варіантом завдання.

2.5.2 Таблиці з результатами розрахунків теплової характеристики корпусу при вільній і вимушеній конвекції.

2.5.3 Для вільної конвекції:

– графіки залежності середнього коефіцієнта тепловіддачі, загальної теплової потужності та теплового опору корпусу електронного апарата від температури у межах від  $t_c$  до  $t_{max}$ :  $\alpha = f_1(t)$ ;  $P = f_2(t)$ ;  $R = f_3(t)$ ;

– висновки стосовно забезпечення нормального теплового режиму електронного апарата для заданої потужності.

2.5.4 Для примусової конвекції:

– графіки залежності середнього коефіцієнта тепловіддачі, загальної теплової потужності та теплового опору корпусу електронного апарата від температури у межах від  $t_f$  до  $t_{max}$ :  $\alpha = f_1(t)$ ;  $P = f_2(t)$ ;  $R = f_3(t)$ , побудовані для різних швидкостей руху теплоносія у загальній системі координат;

– графік залежності температури корпусу від швидкості руху теплоносія  $t = f_4(w)$ , побудований для значення теплової потужності  $P = P_2$ ;

– графік залежності теплової потужності від швидкості руху теплоносія  $P = f_5(w)$ , побудований для значення допустимої температури корпусу  $t = [t]$ ;

– висновки стосовно забезпечення нормального теплового режиму електронного апарата для заданої потужності;

– максимальне значення теплової потужності, яке може відводитися від корпусу електронного апарата для заданих умов.

2.5.5 Загальні висновки з роботи.

### 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ

**Мета роботи:** ознайомитися з системами охолодження сучасних РЕЗ та отримати навички щодо їх вибору.

При виконанні роботи слід користуватися теоретичним матеріалом, наведеним у конспекті лекцій, част. 2, стор. 44 – 57, а також рекомендованій літературі.

#### 3.1 Завдання та порядок виконання роботи

Вибрати систему охолодження пристрою згідно заданого варіанту.

3.1.1 Розрахувати допустимий перегрів корпусу пристрою відносно оточуючого середовища за формулою:

$$\Delta t_C = t_{imin} - t_C, \quad ^\circ\text{C}; \quad (3.1)$$

де  $t_{imin}$  – максимально допустима температура **найменш теплотійкого** елемента, задається у ТЗ на розробку;

$t_C$  – максимальна температура оточуючого середовища, задається у нормативно-технічній документації на умови експлуатації.

3.1.2 Розрахувати умовну площу охолодження поверхні корпусу пристрою за формулою:

$$A_y = 2 \cdot (L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2) \cdot L_3 \cdot K_3), \quad \text{м}^2; \quad (3.2)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт заповнення об'єму корпусу.

$$K_3 = \left( \sum_{i=1}^n V_i \right) / V, \quad (3.3)$$

де  $V_i$  – об'єм  $i$ -го елемента,  $\text{м}^3$ ;

$n$  – кількість елементів;

$V$  – об'єм корпусу,  $\text{м}^3$ .

3.1.3 Розрахувати щільність теплового потоку за формулою:

$$q = \frac{P \cdot K_p}{A_y}, \quad \text{Вт/м}^2; \quad (3.4)$$

де  $P$  – сумарна потужність тепловиділення, Вт;  
 $K_P$  – коефіцієнт, що враховує тиск повітря (при атмосферному тиску  $K_P = 1$ );  
 $A_y$  – умовна площа охолодження поверхні корпусу пристрою.

3.1.4 За номограмою (рис. 3.1) визначити рекомендований спосіб (способи) охолодження пристрою.

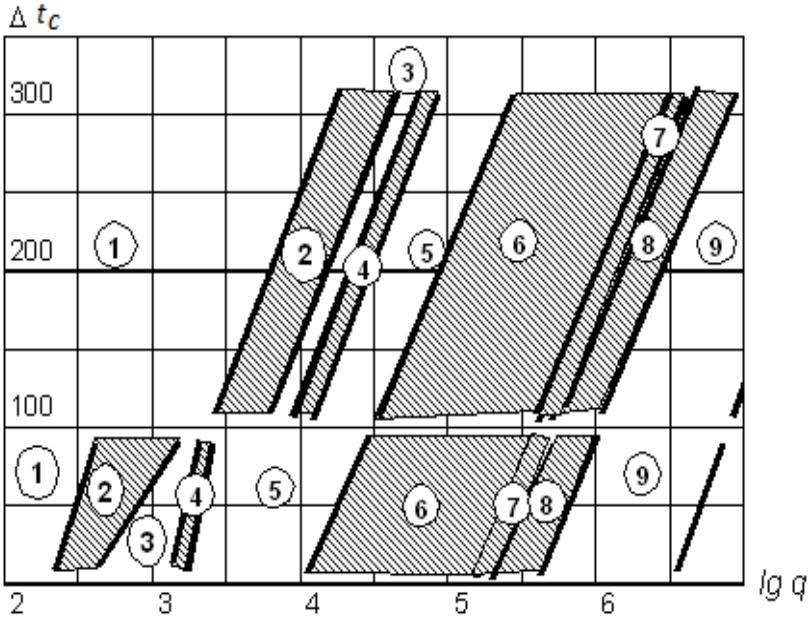


Рисунок 3.1 – Области доцільного використання різних способів охолодження

На номограмі (рис. 3.2) представлені два типи областей. Незаштриховані області передбачають один спосіб охолодження. Заштриховані передбачають застосування двох або трьох способів охолодження.

Для **незаштрихованих** областей можливе застосування наступних типів охолодження:

- 1 – вільне повітряне;
- 3 – примусове повітряне;
- 5 – примусове рідинне;
- 9 – примусове випарне.

Для *заштрихованих* областей можливе застосування наступних способів охолодження:

- 2 – вільне і примусове повітряне;
- 4 – примусове повітряне і вільне рідинне;
- 6 – примусове рідинне і вільне випарне;
- 7 – примусове рідинне, вільне і примусове випарне;
- 8 – вільне і примусове випарне.

Якщо показники охолоджувального пристрою потрапляють у заштриховану область, де можливе використання двох способів охолодження, то вибір системи охолодження потребує більш детальних розрахунків.

3.1.5 У випадку вибору вільної повітряної конвекції у перфорованому корпусі перевірити відповідність теплового режиму заданому в ТЗ за допомогою графіків, наведених на рис. 3.2. Ймовірність  $p$  повинна бути не менш вказаної у завданні  $p_{min}$ .

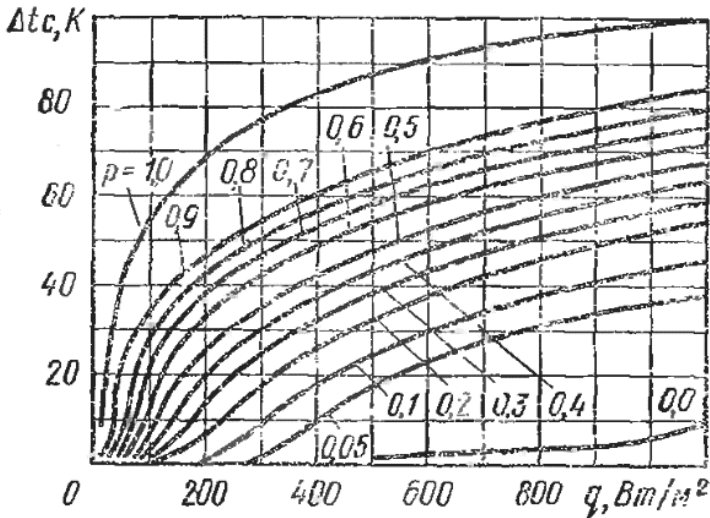


Рисунок 3.2 – Ймовірнісні криві для охолодження пристроїв при вільній повітряній конвекції у перфорованому корпусі

3.1.6 У випадку вибору примусової повітряної конвекції (продув повітря) для заданої ймовірності визначити масові витрати повітря за графіками, наведеними на рис. 3.3.

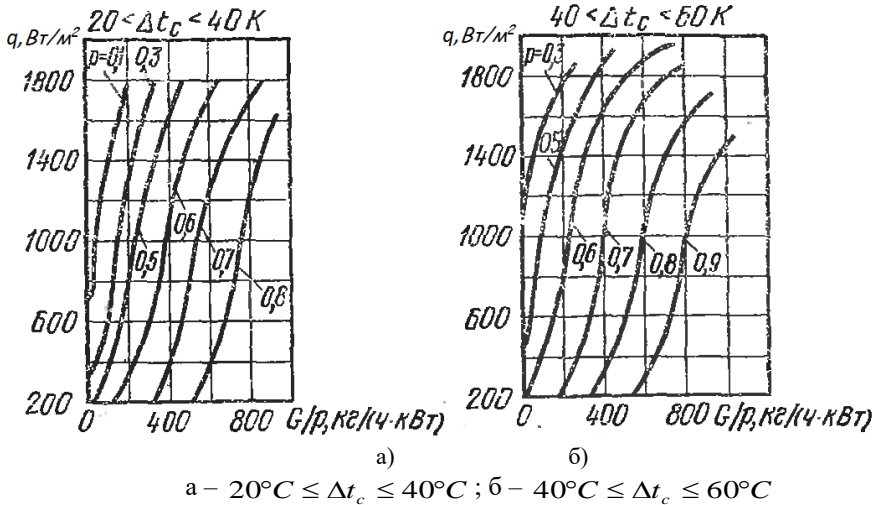


Рисунок 3.3 – Ймовірнісні криві для охолодження пристроїв з примусовим продувом повітря

При цьому слід керуватися наступними критеріями:

- якщо  $p > 0,3$ , даний спосіб охолодження можна обрати;
- якщо  $p < 0,3$ , даний спосіб охолодження не рекомендується.

Необхідно також відзначити, що для підвищення ймовірності забезпечення заданого теплового режиму при вибраному способі охолодження потрібно збільшити питомі витрати повітря примусового повітряного охолодження.

3.1.7 Зробити висновки.

**Додаткові дані:**

- для непарних варіантів пристрій відноситься до стаціонарних;
- для парних варіантів пристрій відноситься до транспортіваних;
- усі пристрої експлуатуються при атмосферному тиску.

### 3.2 Вихідні дані до розрахунків

Вихідні дані наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

№ варіанта	$L_1$ , м	$L_2$ , м	$L_3$ , м	$P$ , Вт	$K_3$	$t_{imin}$ , °C	$t_C$ , °C	$p_{min}$
1	0,30	0,2	0,25	75	0,5	105	55	0,6
2	0,40	0,25	0,30	175	0,6	85	40	0,7
3	0,55	0,30	0,20	300	0,8	70	35	0,6
4	0,50	0,32	0,40	550	0,7	65	45	0,7
5	0,30	0,40	0,10	390	0,4	80	50	0,6
6	0,25	0,45	0,32	600	0,6	90	55	0,7
7	0,42	0,32	0,60	800	0,7	95	60	0,6
8	0,60	0,40	0,20	300	0,5	70	35	0,7
9	0,35	0,28	0,30	100	0,6	75	30	0,6
10	0,25	0,20	0,12	60	0,5	85	40	0,7
11	0,22	0,15	0,20	50	0,3	100	35	0,6
12	0,18	0,12	0,30	30	0,6	95	40	0,7
13	0,40	0,35	0,26	90	0,5	75	35	0,6
14	0,55	0,50	0,45	200	0,4	80	55	0,7
15	0,44	0,35	0,28	350	0,6	95	50	0,6
16	0,22	0,18	0,15	85	0,3	75	35	0,7
17	0,32	0,24	0,20	120	0,4	80	40	0,6
18	0,28	0,25	0,18	75	0,6	70	35	0,7
19	0,50	0,36	0,32	200	0,3	100	45	0,6
20	0,48	0,28	0,35	120	0,5	90	40	0,7

### **3.3 Зміст звіту**

3.3.1 Тема та мета роботи.

3.3.2 Результати розрахунків для вибору способу охолодження.

3.3.3 Рекомендований спосіб (способи) охолодження пристрою, визначений за допомогою номограми.

3.3.4 Оцінка ймовірності забезпечення теплового режиму за допомогою обраного способу охолодження та рекомендації щодо його застосування.

3.3.5 Висновки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Теплові процеси в електроніці / Ю. Я. Бобало, В. Вуйцик, З.Ю. Готра та інші; за ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2007. – 360 с.
2. Бобало Ю.Я. Якість, надійність радіоелектронної апаратури. Елементи теорії і методи забезпечення: монографія / Ю.Я. Бобало, Л.А. Недоступ, М.Д. Кіселичник; за ред. Л.А. Недоступа. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 196 с.
3. Моделювання теплових процесів в РЕА: навчальний посібник / О. І. Нікольський, О. П. Шеремета. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 116 с.
4. Будник А. Ф. Тепломасоперенос у процесах і матеріалах дизайну матеріалів: Навчальний посібник / А. Ф. Будник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 158 с.

## Додаток А

### Граничні температури середовища

Граничні температури середовища в залежності від кліматичного виконання наведені у табл. А.1.

Таблиця А.1 – Граничні температури середовища для різних кліматичних виконань

Кліматичне виконання	Верхня температура, °С	
	робоча	гранична
N	+ 35	+ 45
NF	+ 35	+ 45
TH	+ 35	+ 60
TA	+ 35	+ 45
T	+ 35	+ 60
M	+ 35	+ 45
U	+ 35	+ 60
W	+ 45	+ 60

## Додаток Б

### Значення теплопровідності матеріалів

Значення теплопровідності матеріалів наведені у табл. Б.1.

Таблиця Б.1 – Значення теплопровідності для різних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність $\lambda$ , Вт / м К	
	від	до
Алюміній, Al	230	236
Золото, Au	310	318
Срібло, Ag	420	429
Кремній, Si	120	130
Германій, Ge	52	58
Ковар	17	21
Резистивні плівки марок РС5006, 5402, 3710, 4800	68	74
Полікор	25	38
BeO	205	211
MgO	236	242
Сплав 22ХС	18	20

## Додаток В

### Коефіцієнти чорноти поверхонь

Значення коефіцієнтів чорноти поверхонь наведені у табл. В.1.

Таблиця В.1 – Коефіцієнти чорноти для різних поверхонь та матеріалів

Матеріал	Покриття	Коефіцієнт чорноти	
		від	до
Сталь	Нікелеве	0,05	0,07
Сталь	Хім. Окс	0,86	0,92
Д16	Ан.Окс	0,20	0,40
Д16	полірована пов.	0,04	0,06
Метали	лак чорний мат.	0,96	0,98
Метали	емалі матові	0,92	0,96
Метали	емалі глянцеві	0,92	0,92
Метали	муар чорний, сірий	0,86	0,90
Пластмаси	матові	0,60	0,80
Пластмаси	глянцеві	0,50	0,75

## Додаток Г

### Теплофізичні параметри середовищ

Теплофізичні параметри повітря в залежності від температури наведені у табл. Г.1, води – у табл. Г.2.

Таблиця Г.1 – Теплофізичні параметри повітря для різних температур при тиску 101,3 кПа

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
-50	0,0204	0,00000923	0,728
-20	0,0228	0,00001279	0,716
0	0,0244	0,00001328	0,707
10	0,0251	0,00001416	0,705
20	0,0260	0,00001506	0,703
30	0,0268	0,00001600	0,701
40	0,0276	0,00001696	0,699
50	0,0283	0,00001795	0,698
60	0,0290	0,00001897	0,696
70	0,0297	0,00002002	0,694
80	0,0305	0,00002109	0,692
90	0,0313	0,00002210	0,690
100	0,0321	0,00002313	0,688
120	0,0334	0,00002545	0,686

Таблиця Г.2 – Теплофізичні параметри води для різних температур на лінії насичення

$t$ , $^{\circ}C$	$\lambda$ , $Вт/м \cdot K$	$\nu$ , $м^2/с$	$\beta$ , $1/K$	$\sigma$ , $Н/м$	Pr
0	0,551	0,000001789	-0,000063	0,07564	13,67
10	0,574	0,000001306	0,000070		9,52
20	0,599	0,000001004	0,000182	0,07269	7,02
30	0,618	0,000000802	0,000321		5,42
40	0,635	0,000000653	0,000387	0,06965	4,31
50	0,648	0,000000549	0,000449		3,54
60	0,659	0,000000469	0,000511	0,06622	2,98
70	0,668	0,000000406	0,000507		2,55
80	0,674	0,000000355	0,000632	0,06259	2,21
90	0,680	0,000000315	0,000695		1,95
100	0,683	0,000000283	0,000752	0,05886	1,75
110	0,635	0,000000259	0,000808		1,6
120	0,686	0,000000252	0,000864		1,47
150	0,684	0,000000203	0,001030	0,04866	1,17