

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДАЧІ ЗА УМОВ ТЕПЛОВОЇ КОНВЕКЦІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ
«ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНОГО ТА ХІМІКО-
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФАКУЛЬТЕТІВ ВСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

КИЇВ
НТУУ «КПІ»
2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДАЧІ ЗА УМОВ ТЕПЛОВОЇ КОНВЕКЦІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ
«ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНОГО ТА ХІМІКО-
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФАКУЛЬТЕТІВ ВСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

Затверджено
на засіданні кафедри машин та
апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв.
Протокол № 4 від 15.10.2008 р.

КИЇВ
НТУУ «КПІ»
2008

Дослідження тепловіддачі за умов теплової конвекції: Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Процеси і апарати хімічної технології» для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх форм навчання / Уклад.: В.В. Лукашова, Л.Б. Радченко – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 15 с.

Навчальне видання

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ЗА УМОВ ТЕПЛОВОЇ КОНВЕКЦІЇ

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Процеси і апарати хімічної технології» для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх форм навчання

Укладачі: Лукашова Вікторія Володимирівна,
Радченко Леонід Борисович

Відповідальний редактор Я.М. Корнієнко, д-р техн. наук, проф.

Рецензент Д.Е. Сідоров, канд. техн. наук, доц.

*За редакцією укладачів
Надруковано з оригінал-макета замовника*

ВСТУП

Вільна або теплова конвекція виникає в рідинах і газах внаслідок існування різниці температур. При цьому виникають області з різною густиною газу або рідини, що є причиною переміщення об'ємів з різною температурою. Одночасно відбувається також і переміщення теплової енергії. Розрізняють вільну конвекцію в обмеженому і необмеженому просторі. В першому випадку об'єм рідини порівняно невеликий і конвективні потоки, які виникають біля поверхні тіл, взаємодіють між собою. Якщо ж об'єм рідини досить великий і ці потоки між собою не взаємодіють, то маємо конвекцію в необмеженому просторі.

Мета роботи полягає в експериментальному дослідженні тепловіддачі при вільній конвекції в необмеженому просторі і одержанні критеріального рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розглянемо вертикальну поверхню, температура якої T_n вища, ніж температура оточуючого середовища T_p (рис. 1, а). В цьому випадку теплота передається від поверхні оточуючій рідині. Характер зміни температури в напрямку x , перпендикулярному поверхні наведений на рис. 1, б. Завдяки різниці температур густина рідини біля поверхні менша, тому рідина починає рухатись вздовж поверхні. При цьому шар «налипання» біля поверхні має температуру T_n і швидкість його руху дорівнює нулю. На деякій відстані від поверхні температура стає рівною T_p і швидкість знову набуває нульового значення. Таким чином, швидкість змінюється від нуля, як це показано на поверхні до максимуму і знову падає до нуля, як це показано на рис. 1, б. Рухомий шар рідини називається пограничним шаром. На деякій відстані H_1 товщина цього шару невелика і течія носить ламінарний характер.

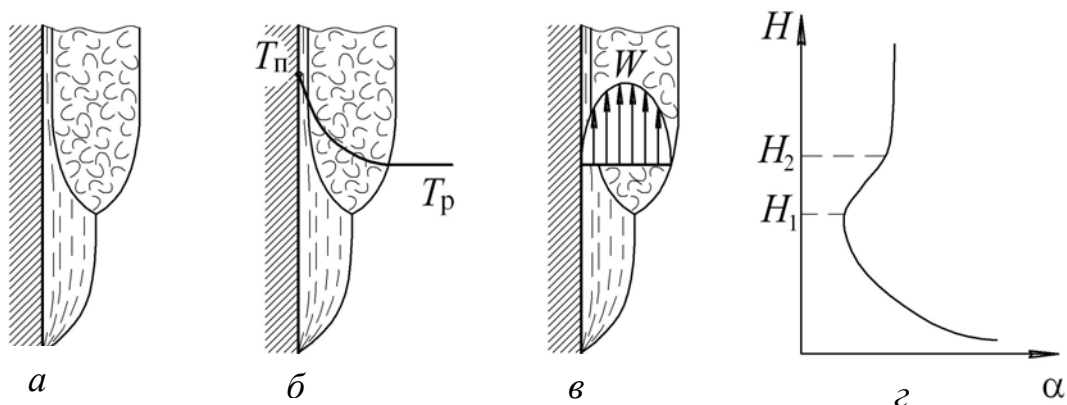


Рис. 1. Конвекція поблизу нагрітої вертикальної поверхні

У міру збільшення товщини пограничного шару починається поступова турбулізація потоку. Характер течії залежить також від різниці температур $(T_n - T_p) = \Delta T$. Так при малих значеннях ΔT можна одержати ламінарну течію по всій висоті поверхні.

У відповідності зі зміною характеру течії змінюється по висоті H також і значення коефіцієнта тепловіддачі (рис. 1, *з*). З формулювання граничних умов третього роду можна одержати таку залежність для коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\Delta T} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x \rightarrow 0}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності рідини. При малих значеннях H температура змінюється в тонкому шарі біля поверхні від T_n до T_p , тому градієнт температур $(dT/dx)_{x \rightarrow 0}$ значний по величині, в той час як значення ΔT змінюється мало. Тому α також має велике значення. Із зростанням H товщина пограничного шару збільшується, градієнт температур швидко зменшується, тому і коефіцієнт тепловіддачі також падає. При подальшому збільшенні H починається поступова турбулізація потоку і на відстані $(H_2 - H_1)$ коефіцієнт тепловіддачі збільшується а потім стабілізується по висоті. Характер зміни швидкості і коефіцієнта тепловіддачі для вертикальних труб зберігається таким, як і для вертикальних поверхонь. Винятком є тепловіддача від тонких дротинок ($d = 0,2 \dots 2$ мм). В цьому випадку поверхня теплообміну мала і кількість теплоти, що передається рідиною, незначна. Навколо такої дротинки утворюється малорухома плівка прогрітої рідини, через яку теплота передається в основному теплопровідністю. Режим теплообміну при цьому називається плівковим.

Для горизонтальних труб характер обтікання залежить від діаметра труби (рис. 2). Якщо діаметр порівняно невеликий (рис. 2, *а*) то ламінарний потік зберігається навколо труби і навіть на деякій відстані над її поверхнею. При більшому діаметрі (рис. 2, *б*) ламінарний потік переходить в турбулентний безпосередньо на поверхні труби.

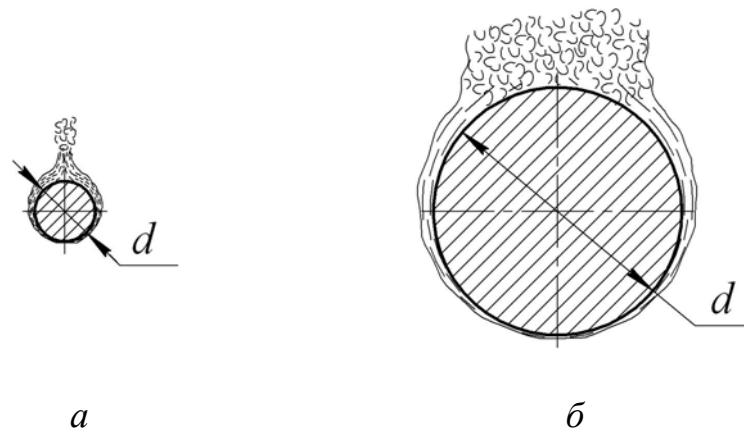


Рис. 2. Конвекція навколо горизонтальних труб

Процес тепловіддачі при вільній конвекції описується таким критеріальним рівнянням:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n (Pr/Pr_{II})^{0,25}, \quad (2)$$

де $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерій Нуссельта; $Gr = g l^3 / \nu^2 \cdot \beta(T_{II} - T_p)$ – критерій Грасгофа; Pr та Pr_{II} – критерії Прандтля, взяті при температурах T_p і T_{II} відповідно; C і n – експериментальні коефіцієнти; l – визначальний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(мК); ν – кінематична в'язкість рідини, м²/с; β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини, К⁻¹; $g=9,81$ м/с².

Теплофізичні властивості рідини вибираються по визначальній температурі, рівній T_p . Визначальний розмір l для вертикальних поверхонь і труб – їх висота H , для горизонтальних труб – діаметр d . Значення коефіцієнтів C і n залежить від режиму течії рідини і наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів C і n в рівнянні (2)

Розміщення	$Gr \cdot Pr$	C	n
Вертикальні поверхні, труби	$10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$	0,76	1/4
	$Gr \cdot Pr > 10^9$	0,15	1/3
Горизонтальна труба	$10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$	0,5	1/4

Теплофізичні властивості сухого повітря при атмосферному тиску приведені в табл. 2. Як видно з таблиці, значення критерію Прандтля для повітря змінюється мало, тому відношення $(Pr/Pr_{II})^{0,25}$ можна брати рівним одиниці. Тоді рівняння (2) набуває вигляду

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n. \quad (3)$$

З таблиці 1 і рівняння (3) видно, що в області турбулентної течії визначальний розмір l в лівій і правій частинах рівняння скорочується. Це означає, що в цій області тепловіддача не залежить від визначального розміру (див. рис. 1, з). Такий процес називається автотельним відносно H .

При вільній конвекції в газах необхідно також враховувати теплообмін випромінюванням, оскільки коефіцієнти тепловіддачі конвекцією α та випромінюванням α_v величини одного порядку.

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі в цьому випадку дорівнює

$$\alpha_c = \alpha + \alpha_v. \quad (4)$$

Значення α_v можна обчислити за рівнянням:

$$\alpha_B = \varepsilon \cdot C_0 \frac{\left(\frac{T_{\Pi} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_p + 273}{100}\right)^4}{T_{\Pi} - T_p}, \quad (5)$$

де ε – степінь чорноти поверхні тіла, C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

Таблиця 2. Теплофізичні властивості сухого повітря

T , °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/кг·К	$\lambda \cdot 10^{-2}$, Вт/м·К	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$\beta \cdot 10^{-2}$, К ⁻¹	Pr
0	1,293	1,005	2,44	17,17	13,28	0,366	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,66	14,16	0,353	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,15	15,06	0,341	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,64	16,00	0,330	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,13	16,96	0,319	0,699

2. ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Схема дослідної установки наведена на рис. 3. Основним її елементом є електронагрівач 1 робочою довжиною H і діаметром d , встановлений горизонтально або вертикально. Потужність, яка подається на нагрівач, регулюється автотрансформатором 2 і вимірюється ватметром 3. Електронагрівач забезпечує постійну щільність теплового потоку q , який при стаціонарному режимі повністю віддається оточуючому повітрю.

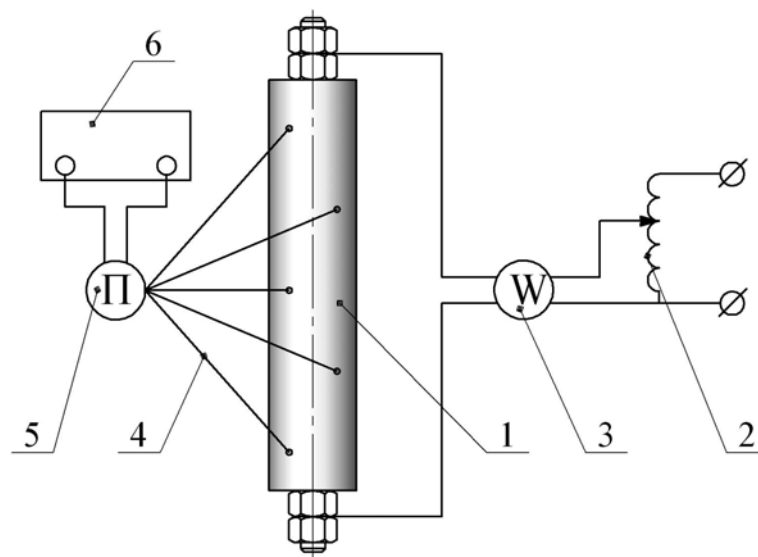


Рис. 3. Схема дослідної установки

На зовнішній поверхні нагрівача встановлено п'ять термопар 4, які вимірюють температуру поверхні. Для замірів температур термопари послідовно підключаються через перемикач 5 до приладу для вимірювання температури 6. Температура оточуючого повітря вимірюється за допомогою термометра (на рис. 3 не показаний).

3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

1. Перед пуском установки впевнитись у відсутності оголених проводів і незатиснутих клем.
2. Вивести на нуль автотрансформатор і ввімкнути електронагрівач.
3. Встановити за допомогою автотрансформатора потрібну потужність нагрівача.
4. При ввімкненому нагріві забороняється торкатись руками або іншими предметами проводів, термопар і нагрівача.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ І ОБРОБКИ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При вмиканні дослідної установки необхідно виконати вимоги п. 3. Після вмикання нагрівача встановити необхідну потужність за допомогою автотрансформатора. Підключити до приладу одну з термопар. Через деякий час встановлюється стаціонарний режим, при якому покази термопари не змінюються. В цьому режимі необхідно заміряти покази термопар, термометра і потужність нагрівача (табл. 3).

Таблиця 3. Результати вимірів

Номер досліджу	Потужність W , Вт	Покази термопар, °C					Температура повітря, °C
		1	2	3	4	5	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Встановити нове значення потужності нагрівача і повторити дослід при новому стаціонарному режимі. Кількість дослідів встановлюється викладачем.

Щільність теплового потоку, який віддається в оточуюче середовище, обчислюють за формулою

$$q = \frac{W}{\pi d H}. \quad (6)$$

Для знаходження сумарного коефіцієнта тепловіддачі визначається спочатку середня температура поверхні нагрівача:

$$T_{\Pi} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{5} \quad (7)$$

і різниця температур

$$T = T_{\Pi} - T_p. \quad (8)$$

Тоді сумарний коефіцієнт тепловіддачі дорівнює

$$\alpha_c = \frac{q}{\Delta T}.$$

Потім за рівнянням (5) знаходиться коефіцієнт тепловіддачі α_v випромінюванням і, нарешті, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією:

$$\alpha = \alpha_c - \alpha_v \quad (10)$$

Таким чином, алгоритм обробки результатів такий:

- знаходиться щільність теплового потоку за рівнянням (6);
- по формулам (7) і (8) обчислюється середня температура поверхні і різниця температур;
- по формулам (9), (5) і (10) визначаються коефіцієнти тепловіддачі, α_c , α_v і α ;
- результати розрахунків заносяться до таблиці 4.

Таблиця 4. Результати обробки експериментальних даних

№ п/п	T_{Π}	T_p	ΔT	q	α_c	α_v	α
	°C	°C	°C	Вт/м ²	Вт/(м ² К)	Вт/(м ² К)	Вт/(м ² К)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

5. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ

Мета узагальнення результатів дослідів полягає в одержанні критеріального рівняння виду

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n \quad (11)$$

за результатами дослідів. В рівнянні (11) відношення $(Pr/Pr_{\Pi})^{0,25}$ приймається рівним одиниці, оскільки значення Pr для повітря змінюється незначно (табл. 2). Логарифмуючи рівняння (11), одержимо:

$$\lg Nu = n \lg(Gr \cdot Pr) + \lg C \quad (12)$$

Позначивши $y = \lg Nu$, $x = \lg(Gr \cdot Pr)$, $B = \lg C$, запишемо рівняння (12) у вигляді

$$y = nx + B \quad (13)$$

Таким чином, в логарифмічних координатах рівняння (13) є рівнянням прямої лінії.

Для знаходження коефіцієнтів C і n рівняння (11) необхідно:

- по температурі T_p (табл. 2) знайти значення теплофізичних властивостей повітря;
- обчислити для кожного дослідів значення критеріїв подібності

$$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda}; \quad Gr = \frac{g H^3}{\nu^2} \beta (T_{\Pi} - T_p); \quad (14)$$

- значення Nu і добутку $Gr \cdot Pr$ занести до таблиці 5;
- нанести значення таблиці 5 на графік залежності $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ в логарифмічних координатах, рис. 4.

Таблиця 5. Результати узагальнення дослідних даних

	Номер дослідів						
	1	2	3	4	5	6	7
Gr·Pr							
Nu							

В найпростішому випадку значення коефіцієнтів C і n можна знайти за методом вибраних точок таким чином. На графіку (рис. 4) провести пряму, яка "найкращим" чином апроксимує дослідні значення. Потім, задавшись двома значеннями $(Gr \cdot Pr)_1$ і $(Gr \cdot Pr)_2$, знайти за графіком (рис. 4) відповідні їм значення Nu_1 та Nu_2 , і записати систему рівнянь:

$$\text{Nu}_1 = C \cdot (\text{Gr}_1 \cdot \text{Pr}_1)^n; \quad (15)$$

$$\text{Nu}_2 = C \cdot (\text{Gr}_2 \cdot \text{Pr}_2)^n. \quad (16)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (15) і (16) відносно C і n , знайти їх значення.

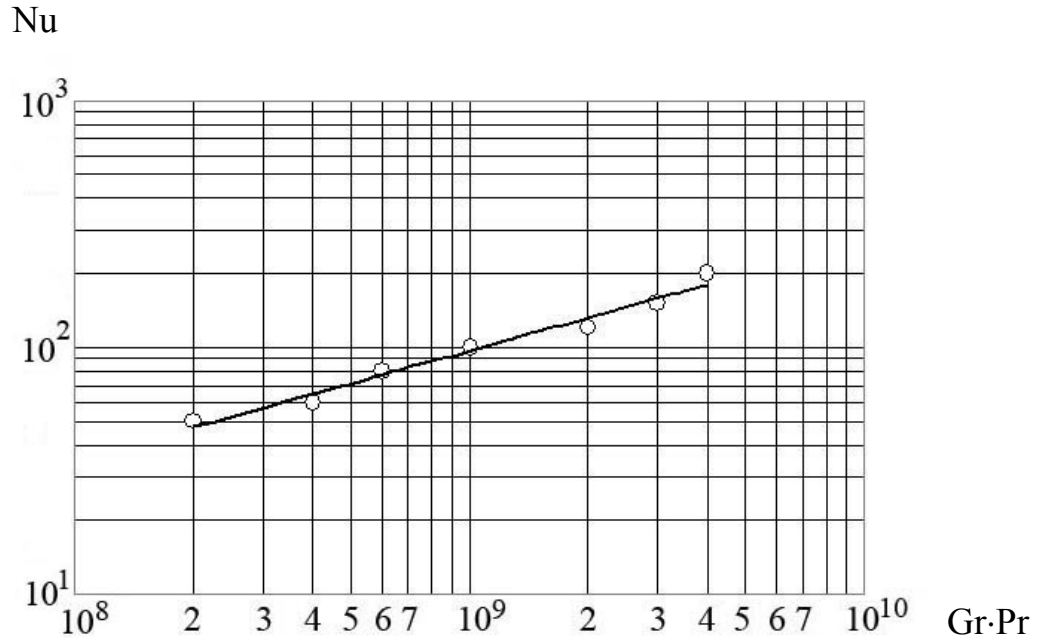


Рис. 4. Залежність критерію Nu від добутку критеріїв (Gr·Pr)

Більш точно значення коефіцієнтів C і n знаходиться по методу найменших квадратів описаному нижче (див. п. 6), таким чином, щоб сума квадратів відхилень дослідних даних від обчислених за цим рівнянням була мінімальною.

6. АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КРИТЕРІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ

Для лінійної залежності, яка описується рівнянням (13) необхідно визначити коефіцієнти B і n забезпечуючи при цьому найменшу середньоквадратичну похибку. Графічно цю задачу можна представити в такий спосіб – у області точок $x_i y_i$ площини $x y$ (рис. 5) потрібно провести пряму так, щоб величина всіх відхилень відповідала умові:

$$U = \sum_{i=1}^m [y_i - y(x_i)]^2 = \min, \quad (17)$$

де $y(x_i)$ – залежність (13).

Для цього потрібно прирівняти нулю похідні

$$\frac{\partial U}{\partial B} = \sum_{i=1}^m [y_i - (B + nx_i)]; \quad \frac{\partial U}{\partial n} = \sum_{i=1}^m [y_i - (B + nx_i)x_i]$$

що дає для визначення невідомих коефіцієнтів B і n систему лінійних рівнянь:

$$mB + n \sum_{i=1}^m x_i = \sum_{i=1}^m y_i; \quad B \sum_{i=1}^m x_i + n \sum_{i=1}^m x_i^2 = \sum_{i=1}^m x_i y_i.$$

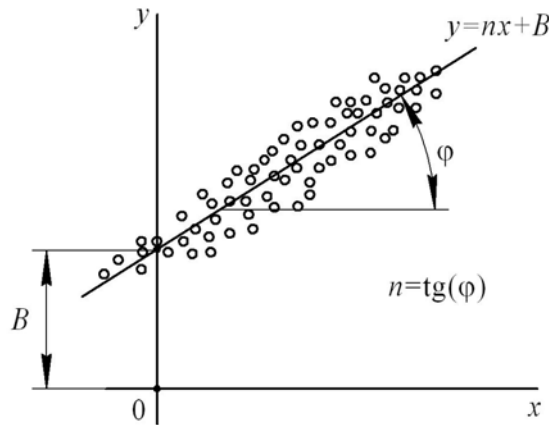


Рис. 5. Графічне визначення коефіцієнтів B і n

Розв'язання цієї системи дозволяє обчислити коефіцієнти n і B рівняння (13) :

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i - m \sum_{i=1}^m x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2}, \quad (18)$$

$$B = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m y_i - n \sum_{i=1}^m x_i \right) \quad (19)$$

Обчислення коефіцієнта парної кореляції k :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i \right) \left(\sum_{i=1}^m y_i \right)}{N}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2}{m}}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^m y_i \right)^2}{m}}, \quad (20)$$

або середньоквадратичної похибки

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m y_i^2 - n \sum_{i=1}^m y_i - B \sum_{i=1}^m x_i y_i \right], \quad (21)$$

що дозволить кількісно оцінювати ступінь наближення точок $x_i y_i$ до прямої.

При обробці дослідних даних введено позначення: $B = \lg C$; $y_i = \lg \text{Nu}_i$ та $x_i = \lg(\text{Gr}_i \cdot \text{Pr}_i)$ – дослідні значення змінних; m – кількість дослідів.

Для розрахунків за формулами (18) та (19) зручно скористатись таблицею 6.

Таблиця 6. Значення величин, які входять в рівняння (13) та (18)

Номер дослідів	$\text{Gr} \cdot \text{Pr}$	Nu	$X_i = \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$	$Y_i = \lg(\text{Nu})$	$X_i^2 = [\lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})]^2$	$X_i \cdot Y_i = \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \cdot \lg(\text{Nu})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
Сума	–	–	$\sum_{i=1}^m X_i$	$\sum_{i=1}^m Y_i$	$\sum_{i=1}^m X_i^2$	$\sum_{i=1}^m (X_i \cdot Y_i)$

При значному обсязі дослідних даних розрахунки зручно проводити з використанням комп'ютерних технологій. Алгоритм обробки дослідних даних представлений схематично на рис. 6.

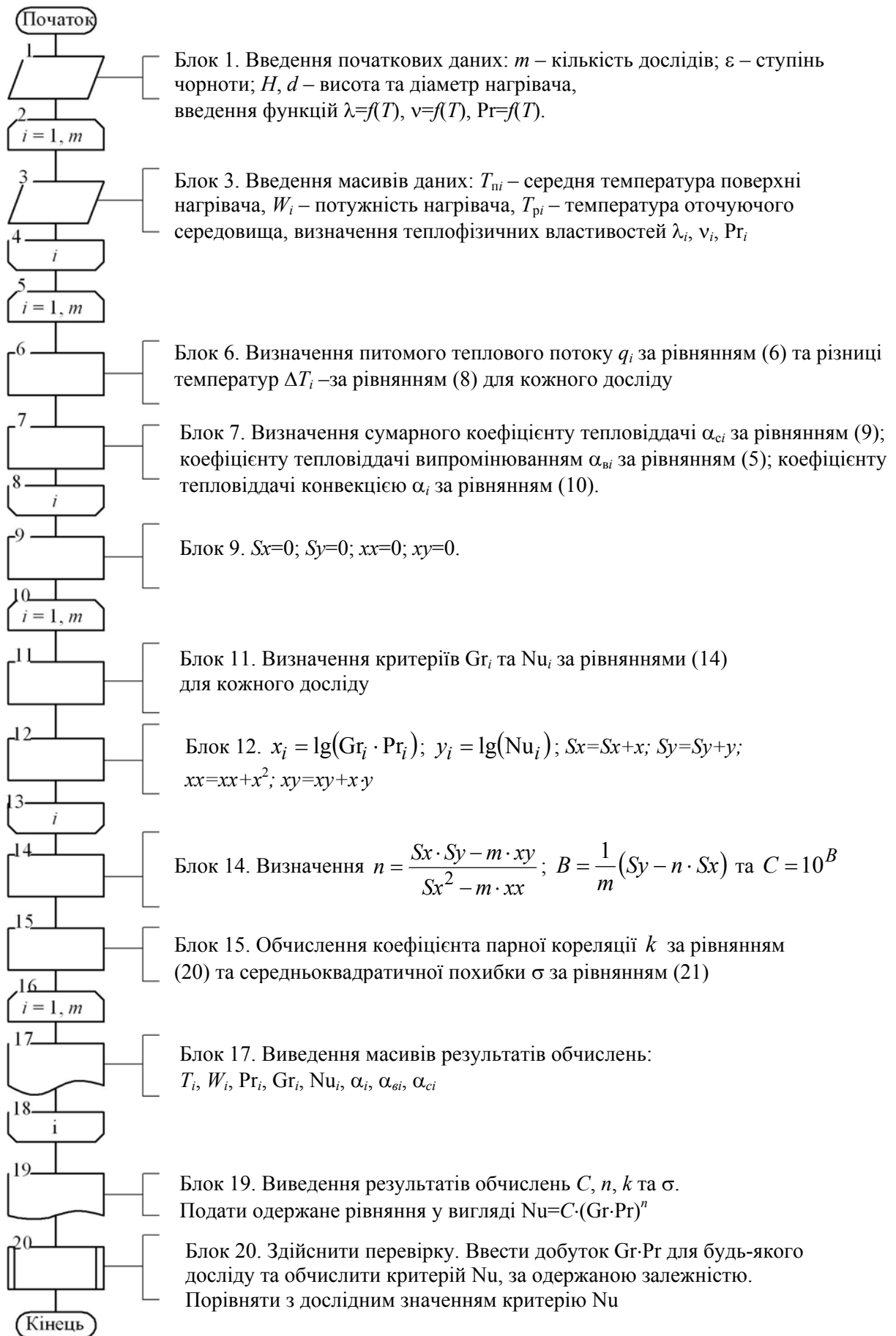


Рис. 6. Блок-схема до програмного розрахунку

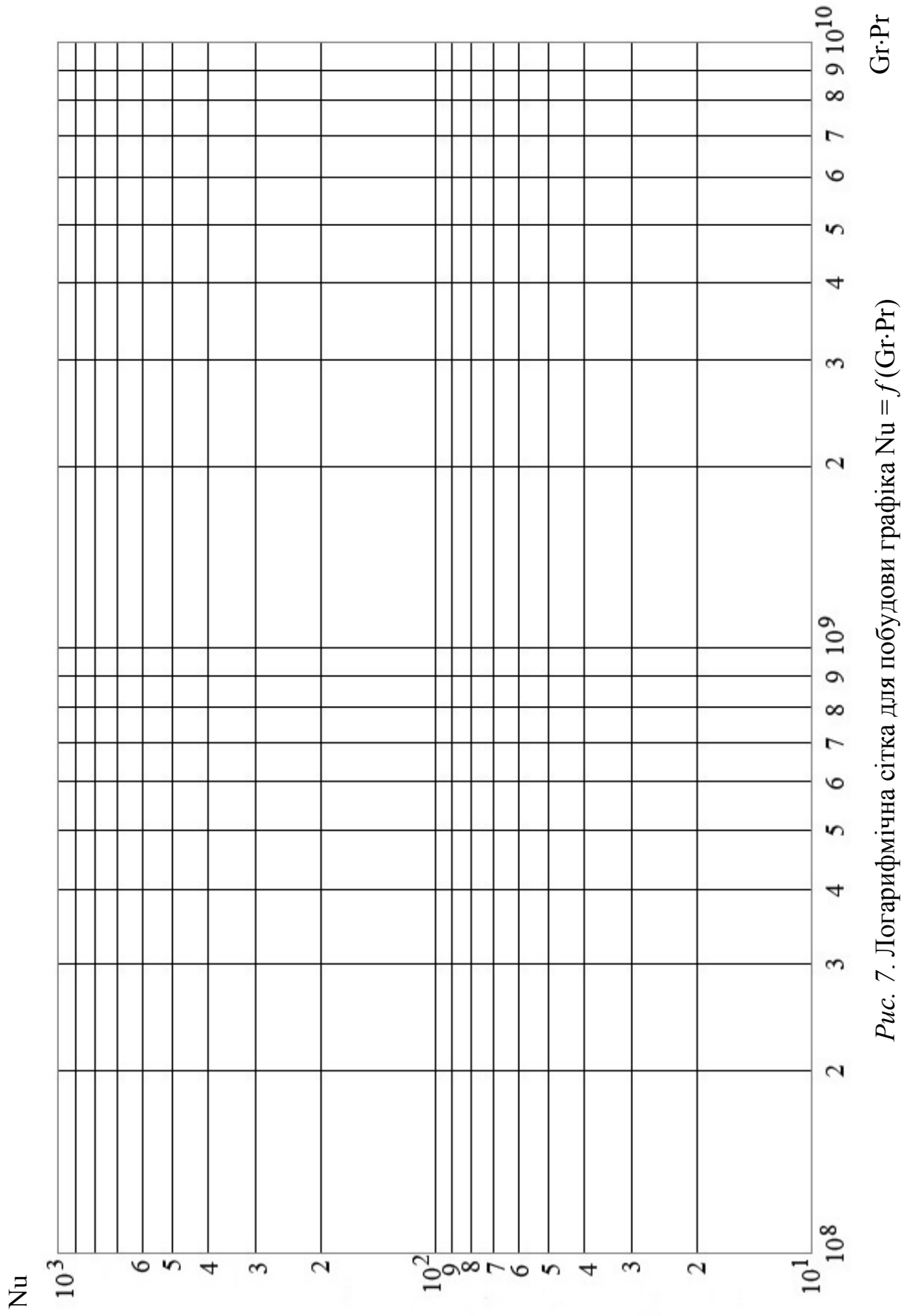


Рис. 7. Логарифмічна сітка для побудови графіка $Nu = f(Gr \cdot Pr)$

6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Записати критеріальне рівняння.
2. Виконати перевірку рівняння. Для цього, задавшись двома значеннями добутку $(Gr \cdot Pr)$, обчислити за одержаним рівнянням відповідні значення критеріїв Nu . Нанести ці точки на графік залежності $Nu = f(Gr \cdot Pr)$, рис. 7. З'єднати одержані точки прямою і, якщо рівняння обчислене вірно, ця пряма має лягти серед дослідних точок.
3. Пояснити характер залежності. Порівняти одержане рівняння з літературними даними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теплові процеси та апарати хімічних і нафтопереробних виробництв: Розділ перший. Теплопередача: Навч. посібник / Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок, Г.Л. Рябцев, М.В. Сезонов. – К.: НМЦВО, 2000. – 172 с .
2. Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменник расчетам – К.: Техніка, 1990. – 164 с.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1992. – 416 с.
4. Дослідження тепловіддачі при тепловій конвекції: Методичні вказівки до проведення НДРС з курсу «Процеси і апарати хімічної технології» для студентів факультету хімічного машинобудування всіх форм навчання / Укл. Л.Б. Радченко. – К.: КПІ, 1994. – 16 с.